

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського»

Квартенко Олександр Миколайович



УДК 628.161

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ЗАСАД УДОСКОНАЛЕННЯ
ТЕХНОЛОГІЙ ОЧИЩЕННЯ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ
ПІДЗЕМНИХ ВОД**

05.17.21 – технологія водоочищення

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано на кафедрі водопостачання, водовідведення та бурової справи Національного університету водного господарства та природокористування (м. Рівне) МОН України

Наукові доктор технічних наук, професор

консультанти: Саблій Лариса Андріївна

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України,
професор кафедри екобіотехнології та біоенергетики

доктор технічних наук, професор

Орлов Валерій Олегович,

Національний університет водного господарства та природокористування
МОН України (м. Рівне),
завідувач кафедри водопостачання, водовідведення та бурової справи

Офіційні доктор технічних наук, професор

опоненти: Хоружий Петро Данилович,

Інститут водних проблем і меліорації Національної академії аграрних наук
України, головний науковий співробітник

доктор технічних наук, професор

Кочетов Геннадій Михайлович,

Київський національний університет будівництва і архітектури МОН України,
професор кафедри хімії

доктор технічних наук, професор

Шевчук Лілія Іванівна,

Національний університет «Львівська політехніка» МОН України,
професор кафедри технології органічних продуктів

Захист відбудеться « 18 » вересня 2019 р. о 15⁰⁰ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26. 002.13 при Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, Київ 56, пр. Перемоги, 37, корпус № 4, велика хімічна аудиторія.

З дисертацією можна ознайомитись у Науково-технічній бібліотеці ім. Г.І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37)

Автореферат розіслано « 8 » серпня 2019 р.

Учений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 26.002.13 к.т.н., доцент

Т.І. Мотронюк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Підземні води є складною багатокомпонентною системою, яка характеризується різними величинами ступенів агресивності, рН, гідрокарбонатної лужності, солевмісту, перманганатної окисності, окисно-відновного потенціалу, кольоровістю, містить іони важких металів (ІВМ), легкоокиснювані органічні сполуки, гумінові кислоти, розчинені гази, а також сполуки, які містять азот (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^-), феноли, ПАР, фосфати. Зважаючи на те, що 24,0% підземних вод основного водоносного горизонту України відносять до умовно захищених, а ще 36,0% – до незахищених, у сучасних умовах при прогресуючому техногенному навантаженні значно підвищується роль станцій водоочищення в загальній системі водопостачання населених пунктів та промислових підприємств. Враховуючи те, що водоводи та водопровідні мережі в населених пунктах влаштовані, в основному, з металевих, чавунних або залізобетонних трубопроводів без внутрішнього антикорозійного покриття, при транспортуванні агресивних вод відбувається їх інтенсивна корозія і повторне забруднення води. Більшість існуючих в Україні станцій очищення підземних вод введено в експлуатацію в середині 70-х років ХХ століття за технологією фільтрування із спрощеною аерацією, яка не передбачала комплексного видалення наведених вище забруднень із проведенням стабілізаційної обробки фільтрату, а також не призначалась для кондиціонування слабокислих вод із низькими значеннями бікарбонатної лужності ($< 2,0$ ммоль/дм³). Водночас щороку на цих станціях накопичується біля 4 тисяч тонн шламу ферум(ІІ, ІІІ) оксидів, утилізація яких є важливою проблемою екологічної безпеки в регіонах.

Прогресуюче погіршення параметрів якості підземних вод викликало необхідність удосконалення відомих класифікаторів технологій водоочищення із врахуванням багатокомпонентності природних вод, а також використання синергетичного ефекту при виборі методів водоочищення із врахуванням оптимальних меж їх застосування за величинами показників: рН, ступеню агресивності, окисно-відновного потенціалу, перманганатної окисності; гідрокарбонатної лужності; концентрацій ІВМ; присутності мінеральних та органічних забруднень як природного, так і антропогенного характеру.

Тому наукове обґрунтування, дослідження та впровадження такого комплексного технологічного рішення, яке передбачає використання комбінованих відомих та удосконалених методів очищення багатокомпонентних підземних вод з їх подальшою стабілізаційною обробкою та використанням осаду від промивки біореакторів в якості реагенту-осаджувача, наприклад, для очищення промивних вод гальванічного виробництва, є актуальним, сучасним, екологічно та економічно вигідним.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертацію виконано на кафедрі водопостачання, водовідведення та бурової справи Національного університету водного господарства та природокористування (НУВГП, м. Рівне) впродовж 2000–2018 рр. Тематика дисертації відповідає пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки, зокрема Загальнодержавній цільовій програмі «Питна вода України» на 2011–2020 роки.

Роботу виконано за науково-дослідними темами кафедри ВВБС (НУВГП): «Розробка нових та вдосконалення діючих споруд для забору, очищення та транспортування води населених пунктів і промислових підприємств» (№ держреєстрації 0108U008519, 2007–2011 р.); «Розробка нових та вдосконалення діючих споруд для забору, очищення та транспортування води населених пунктів і промислових підприємств» (№ держреєстрації 0108U008519, 2011–2014 р.), «Обстеження станції очищення підземних вод м. Корець та видача рекомендацій щодо інтенсифікації її роботи» (госпдоговір № 3-120, 2011 р.) (здобувач – відповідальний виконавець), «Удосконалення існуючих та розробка нових споруд для забору, очищення та транспортування води, очистки стічних вод населених пунктів і промислових підприємств» (№ держреєстрації 0115U003839, 2015–2018 р.).

Мета і задачі дослідження у науковому обґрунтуванні та розвитку наукових засад удосконалення існуючих, розробці та впровадженні нових технологій очищення багатокомпонентних підземних вод із використанням синергетичного ефекту як відомих, так і удосконалених біологічних та фізико-хімічних методів, визначенні раціональних умов та меж їх застосування, що дозволяє скоротити витрати на будівництво та експлуатацію очисних споруд.

Для досягнення поставленої мети необхідно було:

- проаналізувати вплив техногенно-природних факторів на ефективність роботи існуючих технологій та на основі аналізу відомих класифікаторів розробити удосконалений класифікатор технологій очищення багатокомпонентних підземних вод, запропонувати системний підхід щодо вибору методів, процесів та апаратів;
- дослідити вплив величин гідрокарбонатної лужності, концентрацій неорганічного вуглецю, йонів металів, розчиненого кисню, напруженості постійного магнітного поля на ефективність процесів очищення підземних вод;
- дослідити вплив процесу гідродинамічної кавітації на кінетику деструкції, окиснення та вилучення з води гумінових комплексів, амонійного нітрогену, фенолів залежно від їх початкових концентрацій, величин рН, діаметрів сопел, кількості ступенів кавітації в поєднанні з наступною коагуляцією;
- провести дослідження щодо визначення оптимальних типів та доз лужних реагентів для кондиціонування слабокислих залізовмісних підземних вод із низьким лужним резервом при різних концентраціях катіонів NH_4^+ , а також для стабілізаційної обробки води;
- вивчити процеси очищення нейтральних вод з нормальним та підвищеним лужним резервом, які містять антропогенні домішки; агресивних твердих підземних вод на каталітичних та інертних наповнювачах;
- дослідити кінетику комплексного очищення підземних нейтральних вод від органічних та неорганічних сполук за глибиною неоднорідного контактного завантаження біореактора залежно від тривалості процесу, часу контакту води з матриксними структурами біо-мінералів;
- розробити фізичну та математичну моделі процесу очищення підземних вод у контактному завантаженні біореактора;
- провести спектральний аналіз осаду з міжпорового простору контактного завантаження очисних споруд, вивчити кінетику сорбції йонів важких металів (Cr^{6+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+}) матриксними структурами біо-мінералів;

- провести експериментально-виробничі та промислові випробування впроваджених споруд і технологій з метою визначення оптимальних технологічних режимів їх роботи в умовах сезонних та річних змін показників їх якості, нерівномірності експлуатації протягом доби; визначити оптимальні швидкості фільтрування, тривалості фільтроциклів, дози реагентів;

- впровадити у виробництво запропоновані технології, здійснити їх техніко-економічну оцінку.

Об'єкти дослідження – комплексні біологічні та фізико-хімічні процеси очищення багатокомпонентних підземних вод із різними ступенями агресивності, величинами рН середовища, гідрокарбонатної лужності, вмістом високомолекулярних сполук природного та антропогенного походження, консорціумів мікроорганізмів, а також з використанням осаду від промивки технологічного обладнання станцій очищення підземних вод в якості реагенту-осаджувача для видалення йонів важких металів із зворотних та природних вод.

Предмет дослідження – багатоступеневі технології комплексного очищення та кондиціонування багатокомпонентних підземних вод.

Методи досліджень. В роботі використано фотокolorиметричний метод для визначення концентрацій іонів цинку, нікелю, хрому, міді, амонію, феруму, фенолів, сірководню, титриметричний метод для визначення гідрокарбонатної та загальної лужності, вмісту йонів Ca^{2+} , а також перманганатної окисності за методом Кубеля, потенціометричний метод для визначення величин рН – Eh, йодометричний для визначення розчиненого у воді кисню, гравіметричний метод для аналізу сухого залишку, оптичну мікроскопію з фото-відео виходом, електронну мікроскопію з проведенням рентгеноспектрального аналізу матриксних структур біомінералів.

Для вирішення поставлених завдань застосовано фізичне та математичне моделювання процесів, чисельні та аналітичні методи визначення параметрів, дослідні дані для апробації запропонованих методів розрахунку.

Наукова новизна роботи полягає у розвитку наукових засад, розробці нових та удосконаленні існуючих технологій комплексного очищення багатокомпонентних підземних вод на основі науково обґрунтованого раціонального поєднання відомих та удосконалених біологічних та фізико-хімічних методів.

Вперше:

- розроблено теоретичні засади та експериментально доведено вплив величин бікарбонатної лужності, додаткового джерела неорганічного вуглецю, напруженості постійного магнітного поля на ефективність процесів очищення підземних вод;

- доведена ефективність використання комплексу процесів гідродинамічної кавітації – коагуляції для вилучення з підземних вод гумінових комплексів, фенолів, амонійного нітрогену та запропоновано технологію;

- встановлено основні закономірності та механізми процесів комплексного вилучення із підземних вод амонійного нітрогену, розчиненої органіки, а також зміни кисневого режиму та величин рН по висоті контактного завантаження біореактора залежно від тривалості процесу фільтрування, часу контакту води з матриксними структурами біо-мінералів; доведено, що при зміні величин гідравлічних навантажень (від 5 до 10 м/год) у межах фільтроциклу процеси очищення води є стабільними;

- розроблена багатокомпонентна математична модель процесу очищення підземних вод, комп'ютерна реалізація якої дозволяє прогнозувати зміну у часі за глибиною контактного завантаження ефективності очищення, величин біомаси бактерій, що розвиваються на матриксних структурах, та біомаси бактерій які рухаються з потоком води, маси стаціонарних та рухомих матриксних структур в одиниці об'єму, визначати тривалість ефективної роботи очисної споруди між промивками;

- встановлено основні закономірності сумісного використання біологічних та фізико-хімічних процесів очищення багатокомпонентних підземних вод в умовах сезонних та річних змін показників їхньої якості з урахуванням нерівномірності гідравлічного навантаження на технологічне обладнання, що дає можливість оцінити ефективність та надійність роботи розроблених технологій у різних умовах експлуатації;

- доведено можливість вилучення йонів важких металів (Cr^{6+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+}) із промивних вод гальванічного виробництва та підземних вод як на інертних, так і на активованих в магнітному полі матриксних структурах біо-мінералів; запропоновано механізм процесу та технологію очищення;

- запропоновано нові підходи у комбінуванні методів і споруд для комплексного вилучення із підземних вод забруднюючих інгредієнтів з одержанням синергетичного ефекту, зокрема при поєднанні наступних процесів: корегування величин рН, бікарбонатної лужності, концентрації неорганічного вуглецю; з використанням комбінованих окисників: кисню повітря, гідроген пероксиду, а також високоактивних радикалів, які утворюються в результаті процесу гідродинамічної кавітації; із застосуванням матриксних структур біо-мінералів в комплексі з розчином алюміній гідроксохлориду.

Удосконалено:

- класифікатори технологій очищення природних підземних вод з урахуванням їх багатокомпонентності, розроблено системний підхід до вибору методів, процесів та апаратів водоочисних технологій;

Набули подальшого розвитку:

- теоретичні основи механізмів деструкції та вилучення з підземних вод забруднюючих речовин за допомогою комбінування методів гідродинамічної кавітації – коагуляції;
- удосконалення технологій комплексного очищення підземних вод.

Практичне значення роботи. Вирішена важлива народно-господарська проблема підвищення ефективності комплексного очищення та кондиціонування багатокомпонентних підземних вод із різними величинами показників індексів стабільності, рН, гідрокарбонатної лужності, загальної твердості, перманганатної окисності, кольоровості, концентрацій іонів кальцію, йонів важких металів, амонійного нітрогену, фенолів, карбон(IV) оксиду (CO_2), шляхом розробки та впровадження у виробництво комбінованих технологій водопідготовки.

Одержано наступні практичні результати: розроблено нові технологічні рішення щодо очищення багатокомпонентних агресивних підземних вод із низьким лужним резервом комбінованими методами (Деклараційні патенти України № 80341, № 79151); активації біологічних процесів у постійному магнітному полі (Патент України на винахід № 55767); очищення підземних вод від стійких форм органічних та ферум-органічних сполук (Патент України на винахід № 107844); очищення води від іонів важких металів активованими біо-мінералами (Патент України на винахід № 115496). Отримано ефективні конструктивні рішення очисних споруд (Деклараційний патент України № 84017), установка для комплексного очищення багатокомпонентних підземних вод (Патент України на винахід № 116716). Розроблено рекомендації на проектування біореакторів, споруд фізико-хімічного очищення, освітлювачів-рециркуляторів, вузла стабілізаційної обробки агресивних підземних вод та інших споруд, які передано проектним та експлуатаційним організаціям України.

Запропоновано методику розрахунку біореакторів із контактним завантаженням; багатоступеневих гідродинамічних кавітаційних пристроїв; блочних споруд для фізико-хімічного очищення; вузлів стабілізаційної обробки води.

Удосконалено ряд існуючих та розроблено нові технології із використанням комбінованих, відомих та удосконалених методів очищення та кондиціонування: агресивних (із надмірно високим ступенем корозії I_L -2,4; I_R 10,8) слабкокислих підземних вод із низьким лужним резервом (до 1,0 ммоль/дм³), забруднених легкоокислюваними органічними речовинами (до 8 мг O₂/дм³ за ПО), амонійним нітрогеном та сірководнем (до 4 мг/дм³), комплексними сполуками Fe – ГК (до 30 мг/дм³), Cr(VI) (до 0,5 мг/дм³), фенолами (до 0,03 мг/дм³), ПАР (до 1,0 мг/дм³); агресивних (із дуже високим ступенем корозії до I_L -2,0; I_R 10) слабкокислих підземних вод з низьким лужним резервом (до 1,5 ммоль/дм³), високою кольоровістю, які містять амонійні сполуки (до 2,0 мг/дм³), легкоокислювані органічні сполуки (до 6,4 мг O₂/дм³ за ПО), феноли (до 0,06 мг/дм³), сірководень (до 2,0 мг/дм³), комплекси Fe – ГК (ФК) (до 10,0 мг/дм³); агресивних (I_L -1,5; I_R 8) слабкокислих підземних вод із величиною гідрокарбонатної лужності (до 4,5 ммоль/дм³), середнім показником кольоровості (до 80 град. ПКШ), величинами перманганатної окисності 5,8-7,0 мг O₂/дм³ (із сезонними коливаннями до 10 мг O₂/дм³), концентраціями амонійного нітрогену (до 3,0 мг/дм³), сірководню (до 1,5 мг/дм³), комплексів Fe – ГК до 3,4 мг/дм³ (із сезонними підвищеннями до 15 мг/дм³); агресивних (із легким ступенем корозії до I_L -0,48; I_R 7-8) біля нейтральних вод із середнім лужним резервом (2,0-4,0 ммоль/дм³), які містять мінеральні форми феруму (до 5,0 мг/дм³), сполуки NH₄⁺ (до 1,0 мг/дм³), розчинені органічні речовини (за ПО до 6,0 мг O₂/дм³), феноли (до 0,03 мг/дм³); нейтральних вод із підвищеним лужним резервом (7,0-8,5 ммоль/дм³), середньою кольоровістю (до 55 град. ПКШ), концентрацією іонів NH₄⁺ (до 5,5 мг/дм³), Fe(II) до 2,0-5,4 мг/дм³; сірководню (до 2,0 мг/дм³), БСК₅ (до 5,0 мг O₂/дм³); розроблено технологію вилучення іонів важких металів (Cr⁶⁺ до 2,0 мг/дм³, Cu²⁺ до 16 мг/дм³, Zn²⁺ до 50 мг/дм³, Ni²⁺ до 1,3 мг/дм³) із природних та зворотних вод на матрикських структурах біомінералів; технологію та обладнання станції стабілізаційної обробки агресивних вод.

Досліджено роботу запропонованих технологій в експериментально-виробничих та виробничих умовах із подальшим впровадженням на водоочисних станціях таких населених пунктів: с. Балашівка (Балашівського НВК «Колегіум – ЗОШ I-II ступенів»); м. Березне Рівненської області; м. Устилуг та м. Нововолинськ Волинської області, а також у робочих проектах станцій водоочищення м. Корець, смт Рокитне, с. Старе Село Рівненської області, автотранспортного цеху Рівненської АЕС, що підтверджено 15 актами впровадження технологій проектними та експлуатаційними організаціями. За участю здобувача підприємство ПП «Екотехсервіс» в 2013 році розробило рекомендації та на їх основі ТУ У 28.2-32936411-011:2013, які пройшли Державну санітарно-епідеміологічну експертизу в «Інституті гігієни та медичної екології ім. О.М. Марзєєва НАМНУ» і затверджені МОЗ України.

Результати наукової роботи впроваджено у навчальний процес Національного університету водного господарства та природокористування при підготовці фахівців студентів за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія» та напряму підготовки 6.060101 «Будівництво» професійного спрямування «Водопостачання та водовідведення» за дисциплінами: «Якісні показники природних та стічних вод», «Хімія води і мікробіологія», «Рациональне використання та охорона водних ресурсів».

Особистий внесок здобувача. Основні наукові ідеї та робочі гіпотези теоретичних, практичних, експериментальних досліджень, методологія, програма, методи досліджень, вибір об'єктів досліджень розроблено і сформульовано автором особисто. Автором обґрунтовано механізми очищення підземних вод від амонійного нітрогену, розчиненої органіки, сполук феруму, фенолів із застосуванням комбінованих методів, а також експериментально підтверджено ряд положень, які стали основою для наукового обґрунтування раціонального поєднання відомих та удосконалених біологічних та фізико-хімічних процесів очищення та кондиціонування багатокомпонентних підземних вод. Особистий внесок здобувача полягає також у розробці нових та удосконаленні існуючих технологій водопідготовки багатокомпонентних підземних вод, дослідженні процесів їх очищення при різних режимах роботи технологічного обладнання; розробці математичної моделі; дослідженні ефективності застосування комплексу процесів гідродинамічної кавітації – коагуляції; вивченні процесу вилучення ІВМ (Cr^{6+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+}) на матричних структурах біо-мінералів.

Також здобувачеві належить розробка конструкцій біореактора з контактним неоднорідним завантаженням та блоком гідродинамічного кавітатора, багатоступеневого гідродинамічного кавітатора, контактних камер, освітлювачів-рециркуляторів для реалізації запропонованих технологій. Автором удосконалено ряд обраних методів досліджень, систематизовано і проаналізовано отримані теоретичні та експериментальні результати.

Здобувачеві належать основні ідеї опублікованих робіт та патентів. Особистий внесок автора у працях, опублікованих у співавторстві, полягає у теоретичному і методологічному обґрунтуванні мети та основних напрямків досліджень, розробці методик експериментальних досліджень, узагальненні отриманих результатів і

формулюванні висновків. Всі результати досліджень автор отримав особисто. Ідеї співавторів наукових праць у дисертаційній роботі не використовувались.

Автор висловлює вдячність науковим консультантам д.т.н., професору Саблій Л.А., д.т.н. професору Орлову В.О. за професійну допомогу на різних етапах виконання дисертації.

Апробація результатів роботи. Основні результати досліджень і головні положення дисертації автор доповідав на міжнародній науково-практичній конференції "Сучасні проблеми охорони довкілля, раціонального використання водних ресурсів та очистки природних вод" (м. Миргород, 2003), 7-й Міжнародному конгресі «Вода. Екологія і технологія» (м. Москва, 2006), міжнародній науково-практичній конференції «Екологія. Наука. Техніка» (м. Ялта, 2009 р.), 3-й Міжнародній науково-технічній конференції «Актуальні проблеми водного господарства і природокористування» (НУВГП, м. Рівне, 2009 р.), III Міжнародній науково-практичній конференції «Вода, екологія, суспільство» ХНАГХ (м. Харків, 2010 р.), III міжнародній науково-практичній конференції «Екологія. Наука. Техніка» (м. Коктебель 2010 р.), IV mezinárodní vědecko – praktická conference «Dny vědy – 2011» (м. Прага, 2011 р.), конференції «Енергосбереження та енергоефективність на підприємствах водопровідно-каналізаційного господарства» (м. Москва, ЕКВАТЕК-2012), VIII Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Aktualne problemy nowoczesnych - 2012» (м. Пшемишль, 2012 р.), IX mezinárodní vědecko – praktická conference «Dny vědy – 2013» (м. Прага, 2013 р.), IX Международной научно-практической конференции «Будущие исследования - 2013» (м. Софія, 2013 р.), IV Всеукраїнському з'їзді екологів з міжнародною участю (м. Вінниця, 2013 р.), Міжнародному Конгресі «ЕТЕВК – 2013» (м. Ялта, 2013 р.), Міжнародному водному форумі «AQUA UKRAINE - 2013», Міжнародних науково-практичній конференціях «Технології очищення води – технічні, біологічні та екологічні аспекти» НТУУ КПП, 2013 р., III, IV, V Міжнародних науково-практичних конференціях «Чиста вода. Фундаментальні, прикладні та промислові аспекти» (м. Київ, НТУУ «КПП», 2015, 2016, 2017 рр.), II міжнародній науково-технічній інтернет-конференції (м. Харків – ХНУГХ, 2016 р.), Всеукраїнській науково-практичній конференції, присвяченій Всесвітньому дню води «Вода і робочі місця» (м. Київ, 2016 р.), XIX Міжнародній науково-практичній конференції «Екологія. Людина. Суспільство» НТУУ «КПП», (м. Київ, 2016 р.), III, IV Міжнародних науково-практичних конференціях «Водокористування: технології, споруди, менеджмент» КНУБА (м. Київ, 2016, 2017 рр.), Міжнародних науково-практичних конференціях «Актуальні проблеми енерго-ресурсозбереження та екології» ОДАБА (м. Одеса, 2015, 2017 рр.), I, II Міжнародних науково-практичних конференціях «Водопостачання та водовідведення. Проектування, будова, експлуатація, моніторинг», НУ «Львівська політехніка» (м. Львів, 2015, 2017 рр.).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в 75-ти наукових працях, у тому числі: 24 статті у наукових фахових виданнях України (з них 6 входять до міжнародних наукометричних баз даних), 9 статей у наукових періодичних виданнях інших держав, 4 патенти України на винахід та 4

патенти України на корисну модель, 23 тези доповідей на науково-технічних конференціях, 11 статей в інших наукових виданнях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, семи розділів, списку використаних джерел та додатків. Матеріали дисертації викладено на 428 сторінках друкованого тексту, у т.ч. основний текст – на 293 сторінках. Дисертацію ілюстровано 50 таблицями, 143 рисунками. Список літературних джерел включає 312 найменувань, у т.ч. 112 – латиницею.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та основні завдання досліджень, показано наукову новизну і практичне значення отриманих результатів.

У **першому розділі** наведено результати докладного критичного аналізу сучасного стану проблем очищення багатокомпонентних підземних вод, на підставі якого обґрунтовано необхідність проведення досліджень їх комплексної водопідготовки та кондиціонування. Показано, що підземні води є складною багатокомпонентною системою, яка характеризується різними величинами ступенів агресивності, рН, гідрокарбонатної лужності, солевмісту, перманганатної окисності, окисно-відновного потенціалу, містить IBM Fe^{2+} , Mn^{2+} , Cr^{6+} та їх комплекси з гуміновими кислотами, розчинені органічні сполуки природного (гумінові та фульвокислоти) та антропогенного походження (феноли, ПАР), сполуки, які містять азот (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^-), розчинені гази (сірководень, карбон(IV) оксид), а також мікроорганізми. Підкреслено вплив вказаних компонентів на ефективність водоочищення. Розроблено структурну схему взаємного зв'язку інгредієнтів, які входять до складу багатокомпонентних підземних вод. За результатами проведених здобувачем досліджень специфіки якісного складу підземних вод у 91 населеному пункті восьми областей України визначено місце підземних вод у загальній класифікації технологій кондиціонування, встановлено їх основні якісні показники, що дозволило класифікувати підземні води розглянутого регіону за наступними параметрами.

Підземні слабокислі (рН 5,0 – 6,5) агресивні води (із дуже високим ступенем корозії $I_L \approx -2,0$), незначним лужним резервом ($< 2,0$ ммоль/дм³), високою кольоровістю (до 80 град. ПКШ), які містять розчинені органічні сполуки (за величинами ПО 4-8 мг O_2 /дм³), катіони NH_4^+ (від 0,4 до 4,0 мг/дм³), Fe^{2+} як в мінеральних, так і в органічних формах (від 2,0 до 30,0 мг/дм³), сірководень від 1,5 до 4,0 мг/дм³, на деяких водозаборах феноли (0,01-0,12 мг/дм³) та манган (до 0,5 мг/дм³). Такі води складають до 20% від досліджених нами водозаборів.

Майже нейтральні, агресивні води (які проявляють тенденцію до корозії ($I_L \approx -1,0$), із середнім лужним резервом (2,0-4,0 ммоль/дм³), величинами перманганатної окиснюваності (4,0-8,0 мг O_2 /дм³), забруднені йонами NH_4^+ (в межах 1,1-3,0 мг/дм³), різними формами Fe(II) (3,0-30,0 мг/дм³), а в деяких випадках фенолами (до 0,01 мг/дм³), складають 7% від досліджених водозаборів.

Нейтральні (рН 6,5 – 7,5), корозійно активні води ($I_L \approx -1,0$ – (-1,5)), із малим лужним резервом ($< 2,0$ ммоль/дм³), які забруднені легкоокиснюваними органічними речовинами, за ПО до 4,0 мг O_2 /дм³ (із сезонними коливаннями до

9,0 мг $O_2/дм^3$), а також містять амонійні сполуки (до 1,5 мг/дм³), катіони феруму (від 2,0 до 6,0 мг/дм³), сірководень (до 2,0 мг/дм³) – складають 5%. Нейтральні підземні води (рН 6,5 – 7,5), із середнім (2,0-4,0 ммоль/дм³) та нормальним (4,0-6,0 ммоль/дм³) лужним резервом, з індексом стабільності $I_L \approx -1,0$, які містять розчинені органічні забруднення 4,0 – 8,0 (до 12 – 24) мг $O_2/дм^3$ за ПО, іони NH_4^+ та сірководень від 0,5 до 1,0 (4,0) мг/дм³, катіони Fe(II) 2,0-4,0 (6,5-12,5) мг/дм³ та Mn(II) до 0,5 мг/дм³, в деяких підземних водах спостерігається сезонна або постійна присутність фенолів (від 0,036 до 0,27 мг/дм³), підвищений рівень кольоровості (>125 град. ПКШ) та каламутності (до 12 мг/дм³), а також підвищена твердість води (>8,4 ммоль/дм³) – складають до 28% загальної кількості досліджених водозаборів.

Слаболужні підземні води (рН 7,5 – 8,5) з нормальним лужним резервом (4,0-6,0 ммоль/дм³), індексом стабільності $I_L \approx -0,5$, концентраціями іонів NH_4^+ (від 0,4-1,0 до 3,8 мг/дм³), Fe^{2+} (від 1,0 до 3,0 мг/дм³), вмістом розчинених органічних речовин за ПО (до 3,0 мг $O_2/дм^3$) – складають до 6% від досліджених водозаборів.

Нейтральні води з дуже легким ступенем корозії, нормальним лужним резервом, незначним вмістом розчинених органічних речовин (< 4,0 мг $O_2/дм^3$), іонів Fe^{2+} (до 3,0 мг/дм³) та NH_4^+ (до 1,0 мг/дм³ із сезонними підвищеннями до 3,15 мг/дм³), фенолів до 0,001 мг/дм³ становлять 7%.

Нейтральні води з підвищеною гідрокарбонатною лужністю (7,0-8,5 ммоль/дм³), кольоровістю (до 55 град. ПКШ), перманганатною окиснюваністю від 1,5 до 8,0 мг $O_2/дм^3$, а в окремих випадках до 14,0 мг $O_2/дм^3$, іонів NH_4^+ (до 5,5 мг/дм³), Fe^{2+} (до 3,0 мг/дм³, а в окремих випадках до 17,5-32 мг/дм³), H_2S (до 1,5-2,0 мг/дм³) та БСК₅ (до 5,5 мг $O_2/дм^3$), що характеризує такі води як брудні. Крім того, на деяких водозаборах спостерігали підвищену твердість води (8,2-10,8 ммоль/дм³). Такі води складають до 27% від загальної кількості досліджених водозаборів.

Проведені здобувачем дослідження щодо визначення стабільності води відносно металу та бетону показали, що лише 8% із досліджених водозаборів не потребують спеціальної стабілізаційної обробки води.

Аналіз використання вітчизняних та закордонних безреагентних технологій очищення слабокислих та нейтральних підземних вод з низьким лужним резервом в присутності розчинених органічних сполук показав недостатню ефективність їхньої роботи та агресивність фільтрату. Крім того, в сучасних умовах підвищеного антропогенного навантаження, для видалення ряду забруднень, необхідно впроваджувати додатково спеціальні методи водоочищення, якими не забезпечені розглянуті технології. Застосування лише реагентних методів призводить до необхідності використання додаткового технологічного обладнання, що ускладнює експлуатацію, збільшує вартість очищеної води, а також не виключає можливості утворення хлорорганічних сполук, продуктів озонолізу. Вміст вторинних забруднень у питній воді збільшується при підвищенні дози хлору, рН, температури, кольоровості, окиснюваності, присутності фенолів. Використання схем з активним каталітичним завантаженням доцільне лише при відсутності в підземних водах розчинених органічних сполук, сірководню, бактерій.

В розділі висвітлено вагомий вклад, який внесли у вивчення процесів фізико-хімічного очищення підземних вод Г.Ю. Асс, В.В. Дзюбо, М.Г. Журба,

Е.Ф. Золотова, Г.І. Ніколадзе, О.Я. Олійник, В.О. Орлов, В.Л. Поляков, Т.Є. Мітченко, С.Ю. Мартинов, W.Stum, G.F. Lee, R. Jobin, Н.Тamura, R.C. Barry, та ін. Крім того, відзначено роботи вітчизняних та закордонних вчених у галузі біологічного знезалізнення, а саме В.Ю. Букреєвої, Г.А.Дубініної, М.Г. Журби, А.Ю. Марченко, М.Н. Менчі, М.А. Сафонова, П.Д. Хоружого, Д.В.Чарного, F. Bourguine, С. Czekalla, P. Mouchet, Н.Т. Seppanen, G.E. Sogaard, U. Hasselbarth, Y. Fujikawa та ін.

В розділі також наведено характеристику існуючих технологій видалення амонійного нітрогену та фенолів із застосуванням наступних методів: окиснення (з використанням хлору, озону, калій перманганату та гідроген пероксиду), сорбційного, електрохімічного та іонообмінного, що призводить до збільшення капітальних та експлуатаційних витрат. В якості альтернативного окисника розглянуто високоактивні OH^\bullet -радикали, які утворюються у воді при використанні методу гідродинамічної кавітації (ГДК). Дослідженням методу ГДК присвячено наукові роботи Т.М. Вітенько, Я.М. Гумницького, О.Г. Дубровської, В.А. Кулагіна, А.Ф. Немчинного, М.А. Промтова, І.М. Федоткіна, Л.І. Шевчук та ін.

В розділі розглянуто технології вилучення ІВМ із природних та стічних вод із використанням реагентів-осаджувачів та мікробної біосорбції, дослідженню яких присвячено роботи А.С. Кочергіна, Б.М. Андрєєва, S. Comte, G. Guibaud, S. Ahluwalia, D. Goyal, T. Hennebel, B. De Gusseme, D. M. Sahabi, M. Takeda, Y. Fujikawa та ін. Встановлено, що використання матриксних структур, отриманих в результаті промивки біореакторів та фільтрів станцій біологічного очищення підземних вод для очищення промивних вод гальванічного виробництва не було досліджено, проте має певний екологічний та народногосподарський інтерес.

В результаті проведеного аналітичного огляду сучасних методів та технологій встановлено, що проблема комплексного очищення та кондиціонування багатокомпонентних підземних вод із різними величинами рН, ступенями агресивності, гідрокарбонатної лужності, перманганатної окисності, кольоровості, а також вмістом мінеральних та органічних комплексів важких металів, амонійного нітрогену, фенолів із можливим використанням осадів промивних вод станцій біологічного очищення як вторинної сировини – реагентів-осаджувачів дотепер залишається невирішеною.

В **розділі 2** наведено характеристику експериментальних установок, основних методів і методик досліджень, параметрів якості досліджуваних вод. В якості досліджуваної води в роботі виступали: природні підземні води, на яких базуються системи водопостачання ряду населених пунктів Рівненської та Волинської областей (табл. 1), а також підземні води заводу ПАО «Полтавський алмазний інструмент», промивні води від гальванічного виробництва ТОВ «Високовольтний Союз – РЗВА» м. Рівне.

Фізико-хімічні параметри якості природних підземних та промивних вод від гальванічного виробництва визначали за стандартними методиками в сертифікованій гідрохімічній лабораторії кафедри водопостачання, водовідведення та бурової справи Національного університету водного господарства та природокористування. Мікробіологічні дослідження проводили в акредитованій у

системі ISO 17025:2006 бактеріологічній лабораторії ДУ «Рівненський обласний лабораторний центр МОЗ України».

Таблиця 1

Параметри якості досліджуваної води в населених пунктах
Волинської та Рівненської областей

Найменування параметрів, розмірність	Волинська область				Рівненська область				
	м. Ковель	м. Нововолинськ	м. Устилуг	смт Ратне	м. Березне	м. Корець	смт Рокитне	с. Балашівка	с. Старе Село
pH	7,2 – 7,4	6,75 – 7,1	6,8 – 7,5	7,2	7,0 – 7,2	6,8 – 7,05	5,8 – 6,0	6,4	5,8 – 6,5
Лужність, ммоль/дм ³	4,8 – 5,08	6,0 – 7,5	7,5 – 8,4	6,5	2,0 – 3,8	6,7 – 7,8	0,8	1,4 – 1,6	1,0 – 2,7
ПО, мгО ₂ /дм ³	4,8	1,2 – 1,6	2,3 – 4,7	8,9 – 34	3,5 – 4,0	3,96 – 4,5	7,0	5,0 – 6,0	5,8 – 10
Fe ²⁺ , мг/дм ³	6,5 – 7,3	До 1,6	2,3 – 5,4	8,5 – 12,5	1,6 – 2,4	0,95 – 2,4	До 30,0	4,5 – 8,7	11 – 14,7
Mn ²⁺ , мг/дм ³	Н.в.	0,077	Н.в.	0,5	0,05	Н.в.	0,5	Н.в.	0,15
NH ₄ ⁺ , мг/дм ³	Н.в.	До 3,16	3,5 – 5,5	1,75 – 4,4	0,5 – 0,8	0,25	1,7 – 4,0	0,5 – 2,0	2,5 – 3,0
C ₆ H ₅ OH, мг/дм ³	Н.в.	Н.в.	Н.в.	Н.в.	0,03	0,055	0,03	0,06	0,05
H ₂ S, мг/дм ³	Н.в.	Н.в.	До 2,0	2,0 – 4,0	0,8	0,85 – 1,0	1,5 – 4,4	До 2,0	До 2,5
I _L	-0,08	-0,32	0,15	-0,67	-0,48	-0,3 – (-0,5)	-2,4	-1,67	-1,57

Процеси вилучення із підземних вод іонів важких металів (Fe²⁺, Cr⁶⁺) у завислому шарі осаду з матриксними структурами біо-мінералів досліджували на пілотній установці у складі: ємності вихідної води; реакційної колби та ємності збирання фільтрату із змінним паперовим фільтром «синя стрічка»; магнітної мішалки ММ-5; насосу Камовського.

Дослідження щодо кондиціонування слабокислих агресивних підземних вод із низьким лужним резервом, підвищеними концентраціями амонійного нітрогену, сполук феруму та карбон(IV) оксиду здійснювали в два етапи: в лабораторних умовах, з метою визначення оптимального лужного реагенту та його доз, а також на діючій станції очищення в Рівненській області.

Дослідження процесів кінетики величин pH, концентрацій амонійного нітрогену, розчиненої органіки, кисню, катіонів Fe²⁺, кількісний та якісний склад мікроорганізмів, а також їх матриксні структури по висоті неоднорідного контактного пінополістирольного завантаження проводили на пілотній установці розташованій в приміщенні водоочисної станції м. Березне. Бактерії ідентифікували за допомогою світлової мікроскопії на мікроскопі Nikon Eclipse E200 (Японія). Електронну мікроскопію зразків матриксних структур біо-мінералів проводили за методом рентгеноспектрального аналізу на растровому електронному мікроскопі Quanta 200 (США), оснащеному рентгенівським спектрометром для проведення мікроаналізу (EDAX).

Процеси очищення нейтральних вод з нормальним і підвищеним лужним резервом, які містять антропогенні домішки, досліджували на реконструйованій, за рекомендаціями автора, станції очищення м. Устилуг. Як реагенти використовували: кисень повітря, розчини натрій гіпохлориту та алюміній гідроксохлориду, як сорбенти: порошкоподібне вугілля та цеоліт.

Процеси очищення агресивних, біля нейтральних вод із підвищеним лужним резервом та твердістю, досліджували на діючому водозаборі м. Корець Рівненської

області. Мета досліджень – порівняти роботу фільтрів в технологічних схемах із різними типами завантаження: кварцового піску, Birm, Manganese Greensand при різних величинах рН та повітря-водяного співвідношення.

Для дослідження процесів деструкції та окиснення гумінових комплексів, фенолів, амонійного нітрогену використовували експериментальну напіввиробничу установку, яка працювала як за проточною, так і циркуляційною схемами. До складу установки входили: металевий бак з модельними розчинами, насосний агрегат, гідродинамічні кавітатори, манометри, контактна камера, запірна арматура. Кавітатори було обладнано змінними соплами та кавітаційними насадками різних типів.

Дослідження щодо вилучення ІВМ Zn^{2+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} , Cr^{6+} із промивних вод гальванічного виробництва та підземних вод проводили на пілотній установці, яка складалася з ємності розчину промивних вод, контактної колони, блоків постійних магнітів, магнітної мішалки.

Процеси стабілізаційної обробки води досліджували як на пілотних установках, так і на впровадженому за рекомендаціями автора технологічному обладнанні на водозаборах «Південний» м. Нововолинськ та м. Березне. Мета досліджень – визначення оптимальних доз лужних реагентів, вивчення змін параметрів індексів стабільності (I_L) та показників якості води (величин рН, концентрацій катіонів Ca^{2+} , Fe^{2+} , солевмісту, розчиненої органіки) при її транспортуванні по ділянках водопровідної мережі м. Березне та напірних водогонів м. Нововолинськ, розробка та впровадження технології та обладнання.

В розділі 3 проаналізовано відомі класифікатори технологій очищення підземних вод, розроблені Г.І. Ніколадзе, М.Г. Журбою, Ж.М. Говоровою, В.В. Дзубо, за результатами аналізу визначено деякі невраховані фактори, які мають визначальний вплив при проектуванні станцій водоочищення в сучасних умовах. Проведений аналіз дозволив зробити висновок щодо необхідності їх удосконалення з урахуванням багатокомпонентності та варіативності величин визначальних компонентів. Запропонована класифікація підземних вод за основними фізико-хімічними показниками їхньої якості (табл. 2), які впливають на вибір технологій водоочищення. Поділ за класами прийнято згідно зі стандартною класифікацією природних вод за активною реакцією рН. Кожен із класів, в свою чергу, поділяється на чотири підкласи за трьома визначальними компонентами: перманганатною окисністю, гідрокарбонатною лужністю, концентрацією катіонів феруму.

Відповідно до якісного складу природних вод запропоновані блок-схеми технологій та комплексні, як відомі, так і удосконалені, методи їх очищення (табл. 3, табл. 4). Зокрема, для гідрогенкарбонатних слабокислих підземних вод (рН 5,0 – 6,5) технології водоочищення представлені, в основному, реагентними методами. Це пояснюється, насамперед, низькими значеннями величин рН, гідрокарбонатної лужності та високим ступенем агресивності води до бетону та металу. Попереднє підлучення води розчином кальцинованої соди, при величинах гідрокарбонатної лужності $L \leq 2,0$ ммоль/дм³, є необхідним ступенем при використанні комбінованих методів. Для нейтральних гідрогенкарбонатних вод із малим (ПО < 4,0 мг О₂/дм³) та помірним (ПО 4,0-8,0 мг О₂/дм³) вмістом розчинених органічних речовин,

гідрокарбонатною лужністю 2,0-6,0 ммоль/дм³ рекомендовано застосовувати безреагентні методи.

Таблиця 2

Класифікація підземних вод за основними фізико-хімічними показниками їх якості, які впливають на вибір технологій очищення

№ з/п за послідовністю компонентів	Класифікація за рН			
	I	II	III	IV
(0)	Слабокислі рН=5,0 – 6,5	Нейтральні рН=6,5 – 7,5	Слаболужні рН=7,5 – 8,5	Лужні рН=8,5 – 9,5
Підкласи за:				
	1	2	3	4
за перманганатною окисністю, мг О ₂ /дм ³				
1	Незначна <4,0	Помірна 4,0 – 8,0	Середня 8,0 – 12,0	Висока 12,0 – 20,0
за гідрокарбонатною лужністю, ммоль/дм ³				
2	Понижена <2,0	Помірна 2,0 – 4,0	Середня 4,0 – 6,0	Висока 6,4 – 8,5
за концентрацією йонів Fe(II), мг/дм ³				
3	<3,0	3,0 – 5,0	5,0 – 10,0	10,0 – 20,0

Таблиця 3

Умовні позначення основних технологічних методів, засобів та обладнання для очищення підземних вод

Методи, засоби та обладнання			
Умовне позначення	Назва	Умовне позначення	Назва
[СА]	Обробка води методом спрощеної аерації	[ПА]	Обробка води посиленою аерацією
[К(Ф)]	Обробка коагулянтном (флокулянтном)	[С/Л]	Коригування гідрокарбонатної лужності введенням розчину кальцинованої соди
[ФМЗ]	Фільтрування через модифіковане завантаження	[Ф]	Фільтрування (фільтри із різним типом інертного завантаження)
[ГДК]	Гідродинамічна кавітація	[СФ]	Сорбційний фільтр
[СТР]	Стабілізаційна обробка за допомогою реагентів	[Зн]	Знезараження (обробка натрій гіпохлоритом)

Підземні нейтральні води із середнім вмістом розчинених органічних речовин (ПО 8,0-12,0 мг О₂/ дм³), низьким лужним резервом (Л < 2,0 ммоль/дм³), вмістом катіонів Fe²⁺ 10,0-20,0 мг/дм³, NH₄⁺ < 2,0 мг/дм³, С₆Н₅ОН < 0,03 мг/дм³ рекомендовано обробляти шляхом поетапного використання, фізичних, біологічних та фізико-хімічних методів відповідно на першому та другому ступенях очищення. Як альтернативу можна застосовувати комбінаторику фізико-хімічних методів на базі послідовного використання процесів, які супроводжують гідродинамічну кавітацію, контактну коагуляцію, іонний обмін.

В якості методів аерації можливо застосовувати спрощену або посилену аерацію. Метод гідродинамічної кавітації рекомендовано до використання лише за необхідності деструкції комплексних органічних сполук, амонійного нітрогену та фенолів. Технології водопідготовки безкисневих, безсульфітних нейтральних вод (рН 6,5 – 7,5) з невеликим вмістом органіки ($4,0 \leq \text{ПО} \leq 8,0 \text{ мг О}_2/\text{дм}^3$) підвищеними значеннями лужності ($6,4\text{--}8,5 \text{ ммоль/дм}^3$) базуються на застосуванні безреагентних методів. Найбільш простим методом, з точки зору технологій водоочищення, є обробка гідрогенкарбонатних слаболужних вод з рН 7,5 – 8,5, які відносяться до III класу, та лужних вод з рН 8,5 – 9,5 IV класу. Такі води, в основному, обробляються за схемою спрощеної аерації – фільтрування. Для нормалізації величини рН гідрогенкарбонатних лужних вод рекомендовано обробляти їх зрідженням CO_2 . Розроблено загальний системний підхід до удосконалення методів та технологій підготовки багатокомпонентних підземних вод. Виходячи з параметрів якості вихідної води, визначають: методи її аерації та водопідготовки, комплекси використовуваних реагентів та технологічного обладнання. Відмінністю наведеної систематизації є сукупність детальної диференціалізації параметрів якості природних вод за величинами рН, ступенем агресивності (I_L), перманганатної окисності, гідрокарбонатної лужності, вмістом іонів важких металів, NH_4^+ , фенолів, а також методів, процесів, апаратів та реагентів, необхідних для її очищення.

В четвертому розділі наведено теоретичні основи використання комплексу удосконалених комбінованих методів очищення. Розроблено фізичну та на її основі багатокомпонентну математичну модель процесів очищення підземних вод, яка представляє собою систему диференціальних рівнянь. Модель описує етап утворення та розвитку структур із біо-мінералів у міжпоровому просторі контактного завантаження біореактора. В ній враховано наступні параметри: вміст у воді додаткового неорганічного вуглецю, йонів Fe^{2+} , матриксних структур біо-мінералів, утворених в двох фазах, середні величини біомаси мікроорганізмів в одиниці об'єму вихідної води і на поверхні матриксних структур в міжпоровому просторі контактного завантаження. Процеси очищення підземних вод змодельовано у вигляді наступної задачі:

$$V = -\theta(M)\text{grad}P, \quad (1)$$

$$\sigma(M)\frac{\partial B}{\partial t} = W(x,t)B - \nu(x)\frac{\partial B}{\partial x} - \gamma(x,t)H(x,t) - \chi B, \quad (2)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = W(x,t)U + \gamma(x,t) \cdot H(x,t) - \chi U, \quad (3)$$

$$\sigma(M)\frac{\partial C}{\partial t} = -\nu(x)\frac{\partial C}{\partial x} - \alpha_1 W(x,t)B - \alpha_2 W(x,t)U, \quad (4)$$

$$\sigma(M)\frac{\partial F}{\partial t} = -\nu(x)\frac{\partial F}{\partial x} - \beta_1 W(x,t)B - \beta_2 W(x,t)U - R_{chem}, \quad (5)$$

$$\sigma(M)\frac{\partial S}{\partial t} = -\nu(x)\frac{\partial S}{\partial x} - k_1 S + H^*(x,t) + \eta_1 W(x,t)B, \quad (6)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = k_1 S - H^*(x,t) + \eta_2 W(x,t)U. \quad (7)$$

Таблиця 4

Класифікатор технологій очищення слабокислих багатокомпонентних підземних вод

Клас	Підкласи	Умови застосування за ступенем агресивності води, величинами рН, окисно-відновного потенціалу, перманганатної окисності, гідрокарбонатної лужності, а також присутності гумінових комплексів (*ГК), азот амонійних сполук*, фенолів*, CO ₂	Підкласи	Умови застосування за IBM (Fe ²⁺ /Cr ⁶⁺ /Mn ²⁺), мг/дм ³	Технологічні схеми водоочищення	Комбінаторика методів водоочищення
Гідрогенкарбонатні води						
І Грунтові слабокислі води (рН=5,0 – 6,5)	1.	Із незначною кількістю розчинених органічних речовин (ПО<4,0 мг O ₂ /дм ³); *NH ₄ ⁺ <0,5 мг/дм ³ ; C ₆ H ₅ ОН <0,001 мг/дм ³ ; Eh= -150...+50 мВ;	1.1.1	3,0 / - / -	[ПА] → [ФМЗ]→[СтР]→ [Зн]	[Ф]→[ФХ _м]→[Х]
	1.1.	L≤2,0 ммоль/дм ³ ; CO ₂ агр. >0; агресивні води (із дуже високим ступенем корозії) I _L = -1,0...-2,0; I _R = 8,0 –10,0	1.1.2	(3 – 5) / - / -	[C/Л] → [ПА] → [Ф]→[СтР]→ [Зн]	[Х]→[Ф]→[ФХ _а]→[Х]
	2.	ПО 4,0 – 8,0 мг O ₂ /дм ³ ; *NH ₄ ⁺ <1,0 мг/дм ³ ; *K< 50 град. ПКШ; *C ₆ H ₅ ОН <0,03 (0,08 – 0,5)* мг/дм ³ ; *ГК; Eh= -150 мВ;	2.1.3	(5 – 10) / 0,5° / -	*[C/Л]→ [ПА]→[БР°] → [Ф]→[Зн]→→[СтР]	[Х]→[Ф]→[Бх]→[ФХ _а]→→[Х]
	2.1.	L≤2,0 ммоль/дм ³ ; CO ₂ агр. >0; агресивні води (із високим ступенем корозії) I _L <-1,5; I _R = 8,5 – 9,0	2.1.3'		* [ГДК] → [C/Л] → [КК _н]→[К(Ф)]→→[Пл]→[Ф]→[СтР]→[Зн]	[Фх°]→ [Х]→[ФХ _{а/р}]→[Х]
	3.	Із середнім вмістом органічних речовин: ПО 8,0 – 12,0 мг O ₂ / дм ³ ; *NH ₄ ⁺ < 4,0 мг/дм ³ ; *F<2,0 мг/дм ³ ; *K< 70 град. ПКШ; * ПАР<1,0 мг/дм ³ ; *C ₆ H ₅ ОН < 0,03 (0,08 – 0,5)* мг/дм ³ ; *ГК; Eh= -150(-300) мВ	3.1.4	(10 – 20) / 0,5° / -	*[ПА]→[БР°]→[C/Л]→[К(Ф)]→[Ф]→→[СФ]→[Зн]→[СтР]	[Ф]→[Бх]→[Х]→[ФХ _{а/р}]→→[ФХ]→[Х]
	3.1.	L≤2,0 ммоль/дм ³ ; CO ₂ агр. >0; агресивні води (із дуже високим ступенем корозії) I _L = -1,5...-2,0; I _R = 9	3.1.4'	(10–20) / - / до 1,0	* [ГДК]→[C/Л]→[КК _н]→→[К(Ф)]→[Ф]→[ФМЗ]→[Зн]→[СтР]	[Фх°] →[Х]→[ФХ _{а/р}]→→[ФХ _м]→[Х]
	4.	Із високим вмістом органічних речовин: ПО 12,0 – 20,0 мг O ₂ / дм ³ ; *NH ₄ ⁺ < 3 мг/дм ³ ; K< 70 град. ПКШ; *C ₆ H ₅ ОН <0,03 (0,08 – 0,5)* мг/дм ³ ; * ПАР<1,0 мг/дм ³ ; *ГК; Eh= до (-500) мВ;	4.1.4	>20,0 / 0,5° / до 1,0	* [ПА]→[БР°]→[C/Л]→[К(Ф)]→[Ф]→→[ФМЗ]→[Зн]→[СтР]	[Ф]→[Бх]→[Х]→ [ФХ _{а/р}]→→[ФХ _м]→[Х]
	4.1.	L≤2,0 ммоль/дм ³ ; CO ₂ агр. >0; агресивні води (із дуже високим ступенем корозії) I _L > -2,0; I _R ≥10,0	4.1.4'	>20,0 / - / до 1,0	* [ГДК]→[C/Л]→[КК _н]→[К(Ф)]→[Ф]→→[ФП]→[Зн]→[СтР]	[Фх°]→[Х]→[ФХ _{а/р}]→→[Х]
	4.2.	L=2,0 – 4,0 ммоль/дм ³ ; CO ₂ агр. >0; агресивні води (із надзвичайно високим ступенем корозії), I _L >-2,0; I _R ≥10,0	4.2.4	>20,0 / - / до 1,0	[ПА]→[БР]→[К(Ф)]→[Ф]→→[СФ]→[Зн]→[СтР]	[Ф]→[Бх]→[ФХ _{а/р}]→ [ФХ] →→ [Х]
Пояснення: технології із символом * рекомендовано до застосування для вод, які містять феноли із концентраціями 0,08 – 0,5 мг/дм ³ та продуктивністю до 200 м ³ /добу						

Початкові та граничні умови для рівнянь (2-7):

$$\begin{aligned} B(x,t)|_{t=0} &= B_0^0(x); F(x,t)|_{t=0} = F_0^0(x); S(x,t)|_{t=0} = S_0^0(x); C(x,t)|_{t=0} = C_0^0(x); \\ B(x,t)|_{x=0} &= B_*(t); F(x,t)|_{x=0} = F_*(t); S(x,t)|_{x=0} = S_*(t); C(x,t)|_{x=0} = C_*(t) \\ U(x,t)|_{t=0} &= U_0^0(x); M(x,t)|_{t=0} = M_0^0(x). \end{aligned}$$

Рівняння (1) описує процес фільтрації, рівняння (2-5) – процеси окиснення катіонів Fe^{2+} за участю бактерій, які існують як на поверхні контактного завантаження, так і на матрикських структурах у його міжпоровому просторі, а також тих, які вільно рухаються з потоками води. Процеси накопичення-перенесення матрикських структур за висотою контактного завантаження описано рівняннями (6, 7). У диференціальні рівняння входять наступні члени:

W – швидкість росту бактерій, згідно рівняння Моно:

$$W(x,t) = \frac{\mu_{\max} F(x,t) \cdot C(x,t)}{(F(x,t) + K_F)(C(x,t) + K_C)}, \quad (8)$$

де μ_{\max} – максимальна питома швидкість росту мікроорганізмів, $год^{-1}$; $F(x,t)$ – концентрація Fe^{2+} , $г/м^3$; $C(x,t)$ – концентрація додаткового джерела неорганічного вуглецю, $г/м^3$; K_F , K_C – константи насичення, $г/м^3$.

Функція $H(x,t)$, яка встановлює зв'язок між біомасою бактерій в одиниці об'єму вихідної води $B(x,t)$, середньою біомасою бактерій $U(x,t)$ на поверхні зерен завантаження та матрикських структур у міжпоровому просторі:

$$H(x,t) = \begin{cases} B(x,t), & \text{якщо } B(x,t) < B^{**} - U(x,t), \\ B^{**} - U(x,t), & \text{якщо } B(x,t) \geq B^{**} - U(x,t), \end{cases}$$

$$H^*(x,t) = \begin{cases} k_2 \cdot M(x,t), & \text{якщо } M(x,t) < M^*, \\ k_3(M(x,t) - M^*), & \text{якщо } M(x,t) \geq M^*, \end{cases}$$

де $H^*(x,t)$ – функція, яка описує перехід матриксу із стаціонарного стану в динамічний з урахуванням граничного насичення матриксу; M^* – максимальна маса матриксу на одиницю об'єму завантаження, $г/м^3$; M – загальна маса матриксу на одиницю об'єму реактора на момент часу, який розглядається, $г/м^3$.

Функція $k_2 \cdot M(x,t)$, при виконанні умови $M(x,t) < M^*$, описує частковий відрив матрикських структур, де k_2 характеризує швидкість відриву частини матриксу із стаціонарного стану за визначений час до досягнення величини розрахункової брудомісткості, $год^{-1}$. При досягненні умови $M(x,t) \geq M^*$, відбувається відрив матрикських структур із переходом їх у потік води: $k_3(M(x,t) - M^*)$, k_3 – характеризує швидкість відриву матрикських структур в період максимального їх накопичення у верхніх шарах контактного завантаження, $год^{-1}$. $\theta(M)$ коефіцієнт фільтрації; P –

тиск; B – середня величина маси бактерій в одиниці об'єму вихідної води, г/м^3 ; v – швидкість руху води, м/год ; γ – функція швидкості прикріплення бактерій на поверхнях матриксних структурах та зерен завантаження в одиницю часу, год^{-1} ; χ – коефіцієнт швидкості відмирання бактерій, год^{-1} ; U – середня величина маси бактерій на поверхнях первинної оболонки зерен завантаження та біомінералів у міжпоровому просторі в одиниці об'єму, г/м^3 ; α_1 , α_2 та β_1 , β_2 – коефіцієнти масової частки, відповідно, неорганічного вуглецю та Fe^{2+} ; R_{chem} – складова, яка враховує хімічне окиснення; $v(x)S_x$ – компонент, який враховує динаміку конвективного перенесення утворених в потоці матриксних структур біомінералів за висотою контактного завантаження; $(-k_I S)$ – компонент, який описує адгезію матриксних структур, що утворились в динаміці потоку незакріпленими бактеріями, на попередньо утворений матрикс в міжпоровому просторі; $\eta_1 W(x,t)B$; $\eta_2 W(x,t)U$ – компоненти, які враховують утворення нових структур біо-мінералів; η_1 , η_2 – масова частка у вигляді біо-мінералів ($\gamma\text{-FeOOH}$); B^{**} – гранична величина біомаси бактерій в матриксних структурах, г/м^3 .

Чисельний розв'язок моделі наведено для біля-нейтральних підземних вод із нормальним лужним резервом ($\text{Л} = 2 - 4 \text{ ммоль/дм}^3$), ПО до $5,0 \text{ мг О}_2/\text{дм}^3$, без введення додаткового джерела неорганічного вуглецю для умов: $V=10 \text{ м/год}$; максимальна концентрація бактерій $B^* = 9,5 \text{ г/м}^3$; $\mu_{\max} = 0,17 \text{ год}^{-1}$; $K_F = 0,70 \text{ г/м}^3$; $\lambda = 10^{-6} \text{ год}^{-1}$; $F_0^0(x) = 1,6 \text{ г/м}^3$; $F_*(t) = 1,6 \text{ г/м}^3$; $V_0^0(x) = 0,001 \text{ г/м}^3$; $V_*(t) = 0,001 \text{ г/м}^3$; $\beta_1 = \beta_2 = 279$; $\eta_1 = \eta_2 = 530$; $U_0^0(x) = 0,1 \text{ г/м}^3$; $S_*(t) = 0 \text{ г/м}^3$; $S_0^0(x) = 0 \text{ г/м}^3$; $k_I = 0,78 \text{ год}^{-1}$; $\gamma = 0,66 \text{ год}^{-1}$; $M_0^0(x) = 10 \text{ г/м}^3$; $k_2 = 0,1 \text{ год}^{-1}$; $k_3 = 0,9 \text{ год}^{-1}$; $M_*^* = 2,65 \text{ кг/м}^3$.

Комп'ютерна реалізація моделі дозволяє прогнозувати зміну у часі за глибиною контактного завантаження ефективності очищення (рис. 1, а), величин біомаси бактерій, які розвиваються на матриксних структурах (рис. 1, б) та біомаси бактерій, які рухаються з потоком води, маси стаціонарних (рис. 1, в – г) та рухомих матриксних структур в одиниці об'єму, визначати тривалість ефективної роботи очисної споруди між промивками.

На основі відомого вільно-радикального механізму утворення $\text{ОН}\cdot$ -радикалів у кавітаційному потоці запропоновано механізми: деструкції фенолів із наступним виведенням сполук, утворених у результаті рекомбінації інтермедіатів, за допомогою розчину алюміній гідроксохлориду за межі зони реакції; окиснення амонійного нітрогену із утворенням азоту у вільному стані у вигляді двох молекул N_2 ; деструкції та окиснення гумінових комплексів із подальшим виведенням продуктів реакції з осадом при використанні алюміній гідроксохлориду.

В п'ятому розділі визначено межі та раціональні умови застосування комбінованих (відомих та удосконалених) методів очищення багатокомпонентних підземних вод. Встановлено: кількість мікроорганізмів, які беруть участь у процесах водоочищення, ($10^3\text{-}10^4 \text{ кл/см}^3$ у підземних водах, до $10^7\text{-}10^9 \text{ кл/см}^3$ у матриксних структурах контактного завантаження), а також фактори зовнішнього впливу на процеси їх метаболізму: рН – гідрокарбонатна лужність, наявність додаткового

джерела неорганічного вуглецю, вміст розчиненого кисню, вплив постійного магнітного поля.

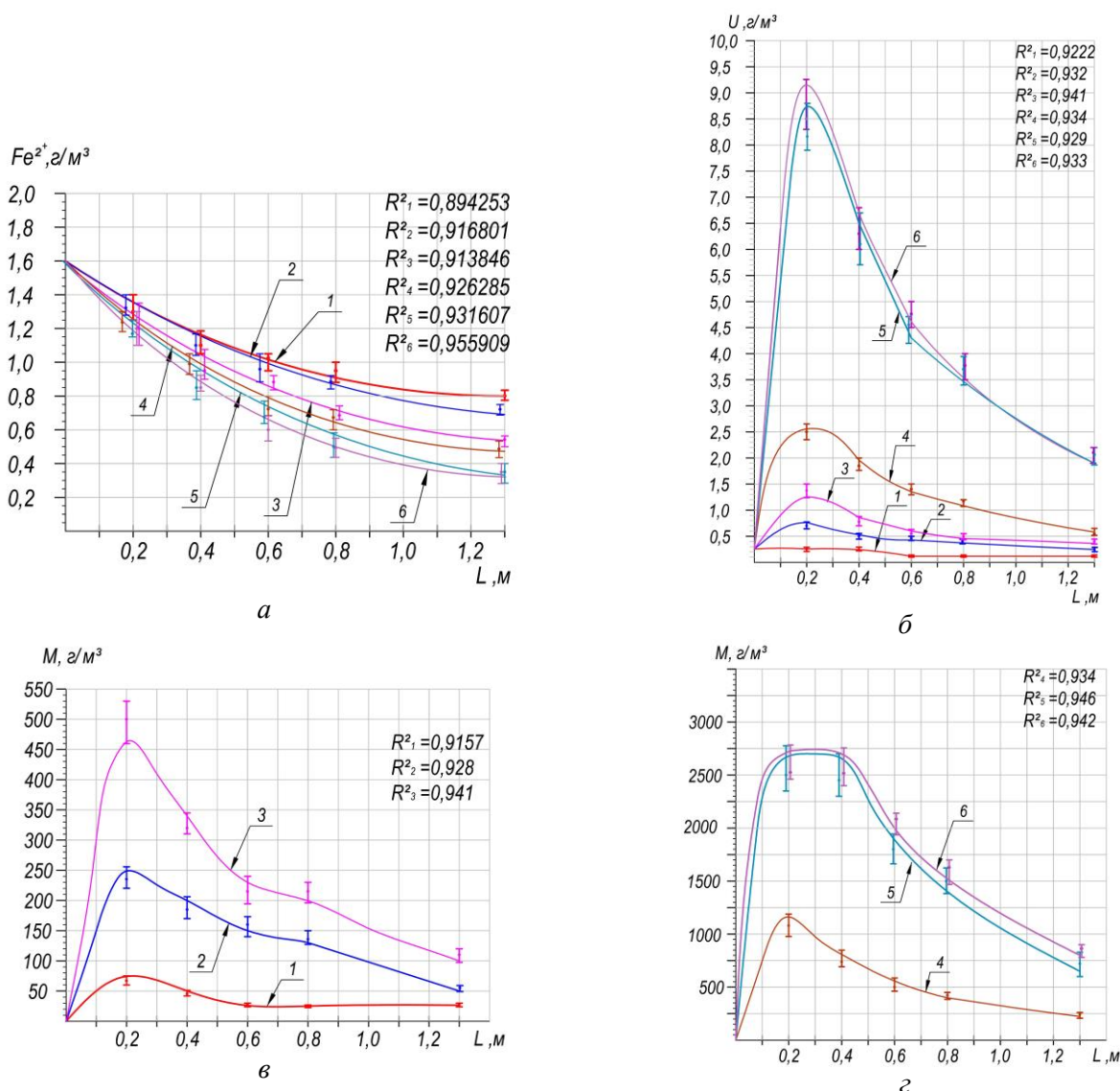


Рис. 1. Розподіл шуканих компонентів по глибині контактного завантаження, отриманих в результаті теоретичних розрахунків та експериментальних досліджень: а – концентрацій катіонів Fe^{2+} ; б – біомаси в одиниці об'єму; в, г – маси матричних структур в міжпоровому просторі в одиниці об'єму в наступні моменти часу: 1 – 4 години; 2 – 16 годин; 3 – 24 години; 4 – 48 годин; 5 – 143 години; 6 – 150 годин

Визначено оптимальні значення гідрокарбонатної лужності (2-4 ммоль/дм³) для їх активного розвитку. Встановлено параметри напруженості магнітного поля, які здатні активувати (5-15 мТл), гальмувати (130-150 мТл) розмноження мікроорганізмів (рис. 2). Встановлено, що використання біохімічного методу дозволяє проводити процес очищення підземних слабокислих вод при концентраціях розчиненого кисню 0,8-1,7 мг/дм³ та концентрації катіонів $Fe(II)$ до 40 мг/дм³.

Відзначено вплив процесу гідродинамічної кавітації на зміну параметрів якості води, а також на кінетику деструкції та окиснення органічних речовин.

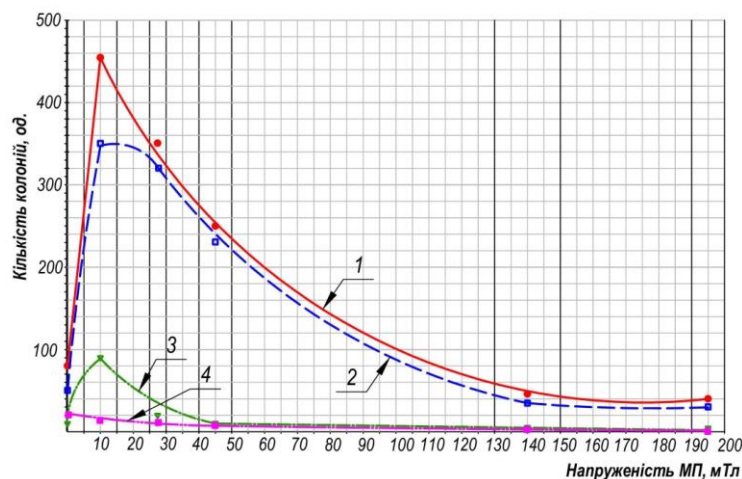


Рис. 2. Залежність кількості колоній мікроорганізмів із третього розведення від величини напруженості ПМП:

- 1 – загальна кількість колоній;
- 2 – кількість дрібних колоній;
- 3 – кількість середніх колоній;
- 4 – кількість крупних колоній

Встановлено, що в результаті сумісного використання процесів гідродинамічної кавітації – коагуляції ефективність очищення води за легкоокиснюваними органічними речовинами підвищується в середньому до 30% порівняно з одноступінчастим процесом обробки води на ГДК, із одночасним збільшенням на 0,2-0,3 одиниці величини рН та на 2-3 мг/дм³ концентрації розчиненого кисню (рис. 3). В результаті застосування методу ГДК відбувається деструкція та окиснення розчинених гумінових комплексів із подальшим їх переведенням до колоїдного стану.

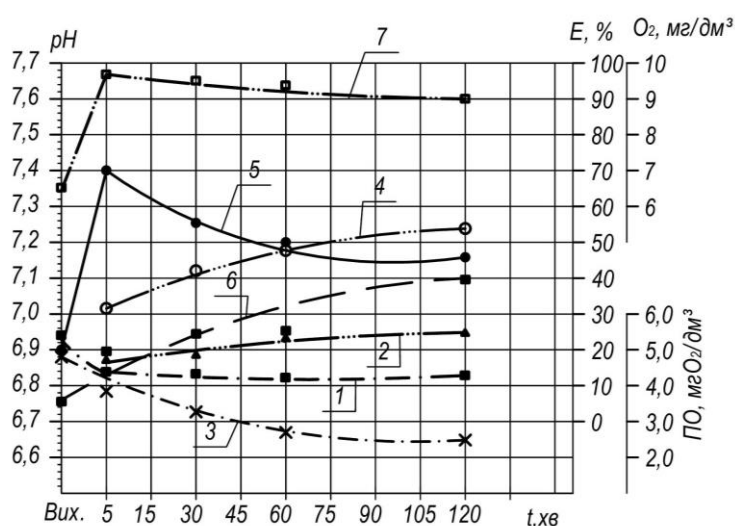


Рис. 3. Кінетика параметрів якості води після її обробки методом ГДК залежно від тривалості перебування води в контактній колоні: 1 – ПО без коагулянту; 2 – ефективності очищення від розчинених органічних речовин за ПО без коагулянту; 3 – ПО після введення коагулянту; 4 – ефективності очищення від розчинених органічних речовин за ПО після введення коагулянту; 5, 6 – величини рН води, відповідно, після ГДК та введення розчину коагулянту; 7 – концентрації розчиненого кисню

За результатами досліджень роботи багатоступінчастого кавітаційного апарату (рис. 4, б) встановлено підвищення ефективності процесу очищення від розчинених органічних сполук на 10-15% порівняно з одноступінчастими при однакових витратах електроенергії на одиницю об'єму води. Доведено підвищення ефективності окиснення амонійного нітрогену (до 32-41%) при використанні методу ГДК порівняно з використанням ежекційного пристрою (21-25%).

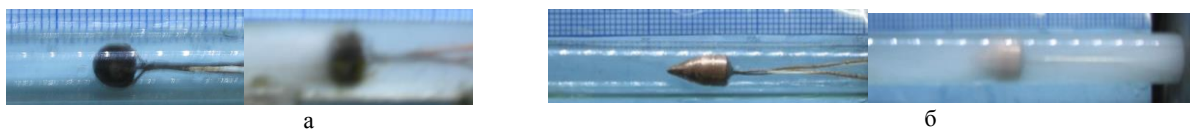


Рис. 4. Виникнення кавітаційного потоку в камері змішування при різних типах насадок: а – металева куля; б – конусна насадка

Встановлено ефективність деструкції фенолів при їх концентрації у вхідній воді (до $0,5 \text{ мг/дм}^3$) і величинах рН 6,4 – 6,5 (рис. 5).

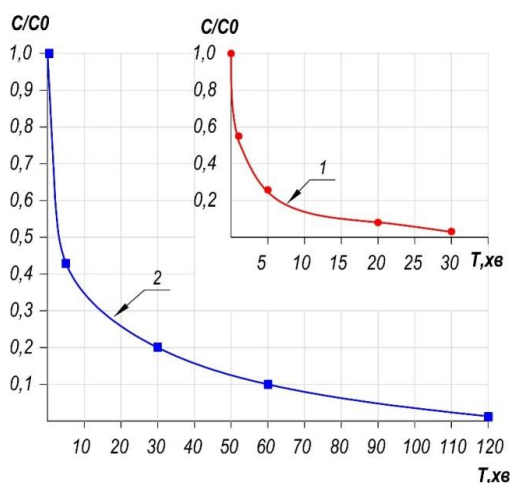


Рис. 5. Кінетика деструкції фенолів залежно від їх концентрації: 1 – $0,08 \text{ мг/дм}^3$; 2 – $0,5 \text{ мг/дм}^3$

За результатами пілотних досліджень процесу очищення слабокислих агресивних (I_1 -2,3) вод із низьким лужним резервом ($0,6$ - $1,18 \text{ ммоль/дм}^3$), із концентраціями іонів Fe^{2+} (до 30 мг/дм^3), NH_4^+ (до $1,0 \text{ мг/дм}^3$) встановлено можливість їх комплексного очищення за комбінованою схемою: спрощена аерація – підключення розчином Na_2CO_3 (50 - 70 мг/дм^3) – обробка в завислому шарі матричних структур із бактеріальною складовою – фільтрування – стабілізаційна обробка фільтрату освітленим розчином $\text{Ca}(\text{OH})_2$ із концентрацією 50 - 60 мг/дм^3 . Встановлено оптимальні параметри гідрокарбонатної лужності ($2,32$ - $3,8 \text{ ммоль/дм}^3$) та рН ($6,9$ – $7,15$) для видалення амонійного нітрогену у контактному завантаженні.

Використовуючи растрову мікроскопію, вивчено матричні структури біо-мінералів (рис. 6). За допомогою рентгенівського спектрометра проведено їх мікроаналіз та визначено об'ємний та атомарний відсотки елементів (табл. 5).

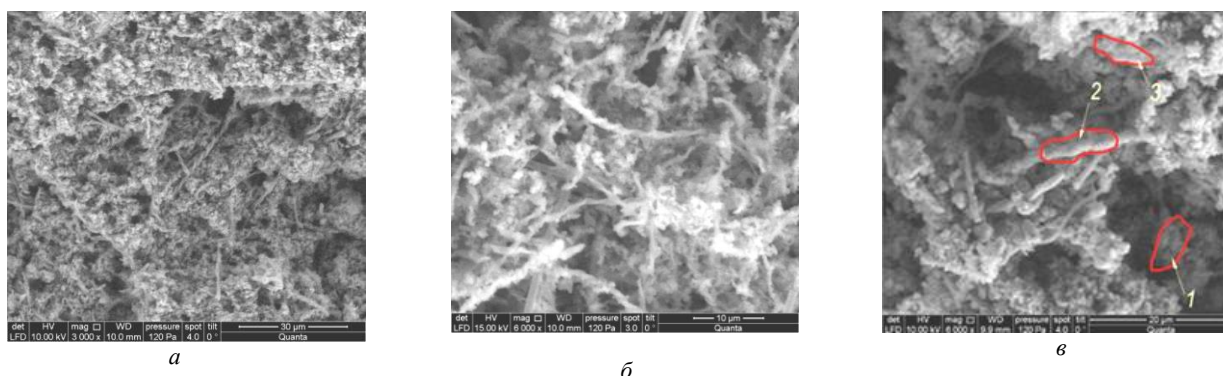


Рис. 6. Електронне зображення матричних структур: а – в осаді промивної води $3000\times$; б – $6000\times$; в – в міжпоровому просторі контактного завантаження $6000\times$

Таблиця 5

Кількісні результати спектрального аналізу свіжого осаду з матриксними структурами біо-мінералів після промивки фільтрів водоочисної станції

№	Досліджуваний осад	Склад елементів									
		ваговий, %					атомарний, %				
		C	N	O	Al	Si	P	S	K	Ca	Fe
1	Осад між матриксними структурами	4,65	0,77	33,13	20,30	25,74	0,15	0,1	8,54	0,22	6,38
		8,56	1,22	45,73	16,71	20,24	0,11	0,11	4,68	0,12	2,52
2	Чохол окремого матриксу	5,56	1,33	28,7	4,48	4,21	0,07	0,31	0,07	0,73	54,55
		12,58	2,58	48,83	4,51	4,08	0,06	0,26	0,06	0,49	26,55
3	Агломерат матриксних структур	6,95	1,17	23,24	5,55	3,40	0,14	0,21	0,14	1,25	57,95
		16,39	2,36	41,17	5,93	3,43	0,12	0,19	0,11	0,89	29,41

За допомогою скануючої електронної мікроскопії визначено зміни параметрів якісного та кількісного складу мікроелементів у матриксних структурах біо-мінералів за період тривалої експлуатації технологічного обладнання (рис. 7). Встановлено, що з часом кількість мікроелементів зменшувалася при збільшенні потенціал-визначальних елементів, таких як кисень (з 45,92% до 60,35% за At%) та Fe (з 5,52% до 12,14% за At%).

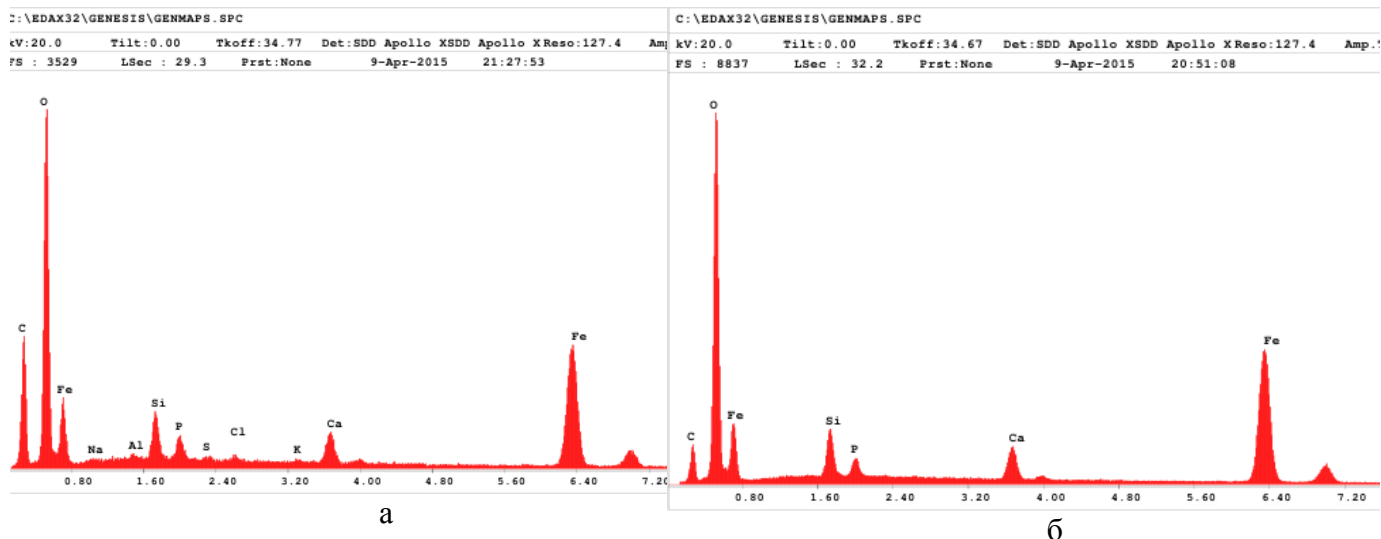


Рис. 7. Рентгеноспектральний аналіз матриксних структур на поверхні гранул контактного завантаження реактора, м. Березне: а – 2012 рік; б – 2015 рік

Встановлено кінетики комплексного видалення забруднюючих речовин за наступними компонентами: йонами Fe^{2+} (рис. 8), ПО (рис. 9, а), катіонами NH_4^+ (рис. 9, б) в залежності від глибини контактного завантаження та тривалості роботи реактора з початку фільтроциклу при різних швидкостях фільтрування. Визначено закономірності зміни кінетики поглинання кисню, величини рН, руху матриксних структур по глибині контактного завантаження залежно від часу роботи та швидкостей

фільтрування. Доведено, що при зміні величин гідравлічних навантажень (від 5 до 10 м/год) у межах фільтроциклу процеси очищення води є стабільними.

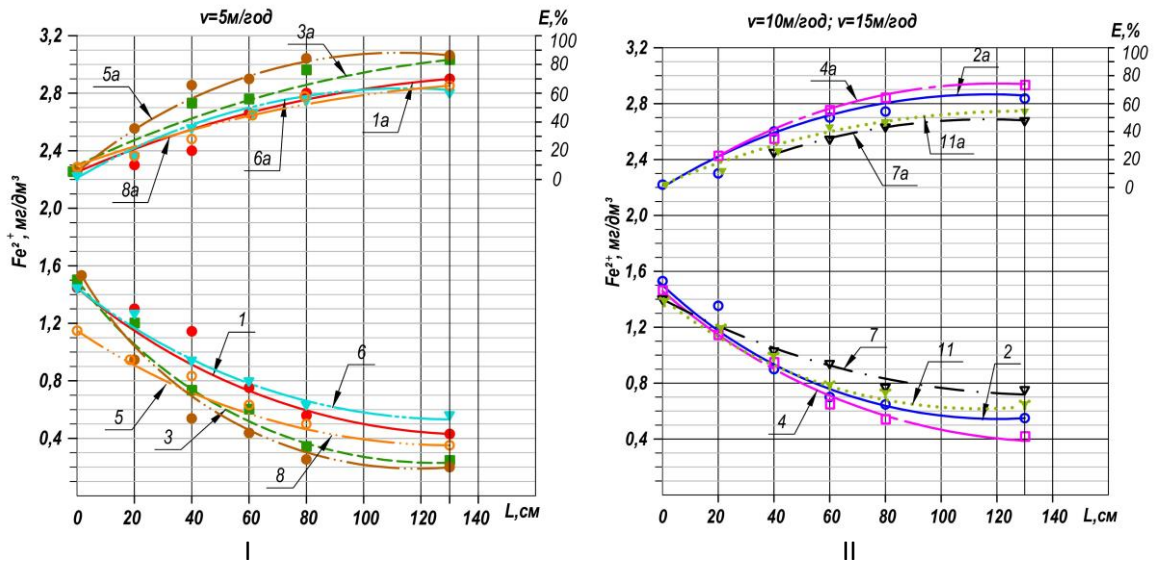


Рис. 8. Зміна концентрації йонів Fe^{2+} залежно від глибини шару контактного завантаження при різних швидкостях фільтрування: I – $V=5$ м/год; II – $V=10$ та 15 м/год

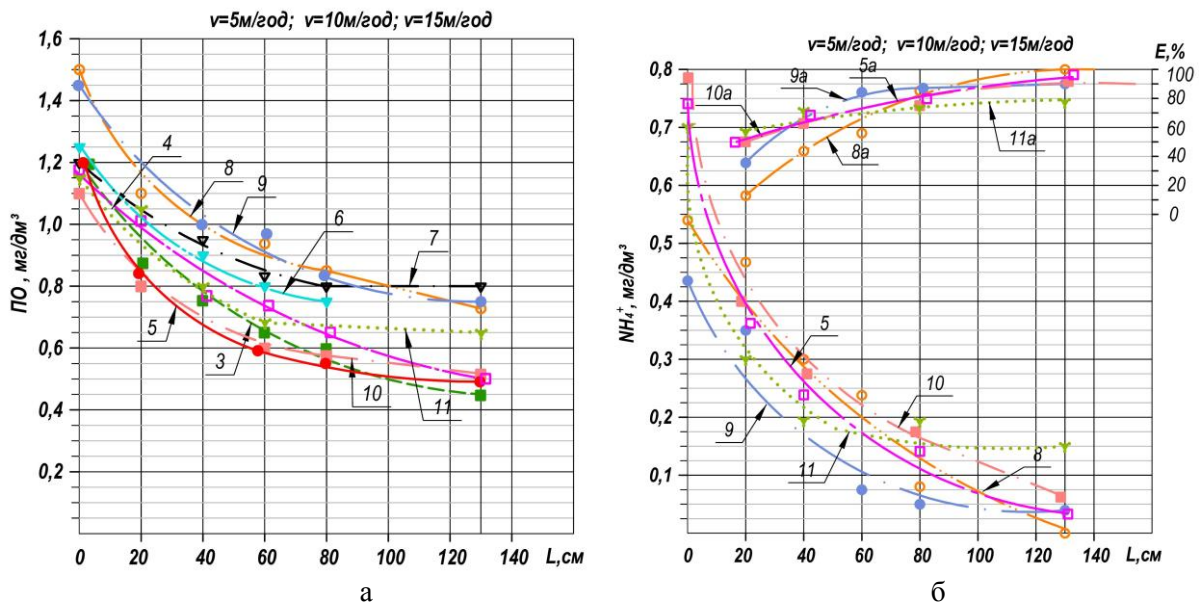


Рис. 9. Зміна ПО (а) та концентрації амонійного нітрогену (б) залежно від глибини шару контактного завантаження, швидкості фільтрування та часу від початку фільтроциклу: 1, 2 – в період сформування матричних структур (при 5 та 10 м/год); при $V=5$ м/год: 6 – 3 год; 8 – 24 год; 10 – 48 год; 3 – 144 год; 5 – 192 год. При $V=10$ м/год: 7 – при зміні гідравлічного навантаження з 5 до 10 м/год; 9 – 48 год; 4 – 143 год. При $V=15$ м/год: 11 – 48 год

Моніторингові дослідження, проведені в період з 2004 по 2015 роки на водозаборах м. Березне і м. Нововолинськ, указали на ряд факторів, які впливали на підвищення агресивних властивостей підземних вод відносно металу та бетону: зниження величини рН, низький лужний резерв і вміст катіонів Ca^{2+} ; присутність у підземних водах агресивного CO_2 , сірководню. В роботі наведено методику визначення розрахункових доз освітленого розчину вапняного молока, необхідного для стабілізаційної обробки, залежно від параметрів якості вихідної води. На рис. 10

наведено залежності змін індексу Ланжелє від часу контакту води з вапняним розчином при різних його дозах. Визначено залежності зміни концентрації катіонів Ca^{2+} та величини рН від числа рециркуляцій досліджуваного вапняного розчину (рис. 11). Встановлено мінімальні концентрації катіонів Ca^{2+} в робочому розчині освітленого вапняного молока, які необхідні для проведення стабілізаційної обробки води (800 мг/дм^3).

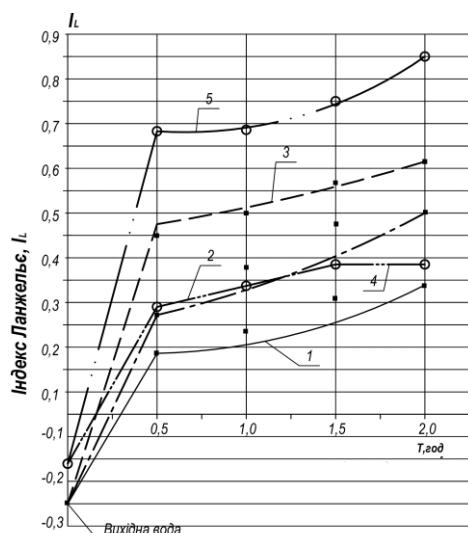


Рис. 10. Залежність зміни індексу Ланжелє від часу контакту води з вапняним розчином при різних дозах СаО. При концентрації катіонів Ca^{2+} в освітленому розчині 1000 мг/дм^3 : 1 – 7 мг/дм^3 для підтримання стабільності води; 2 – 8 мг/дм^3 ; 3 – 16 мг/дм^3 для формування захисної плівки. При концентрації катіонів Ca^{2+} у освітленому розчині 1200 мг/дм^3 : 4 – $8,6 \text{ мг/дм}^3$; 5 – $14,78 \text{ мг/дм}^3$

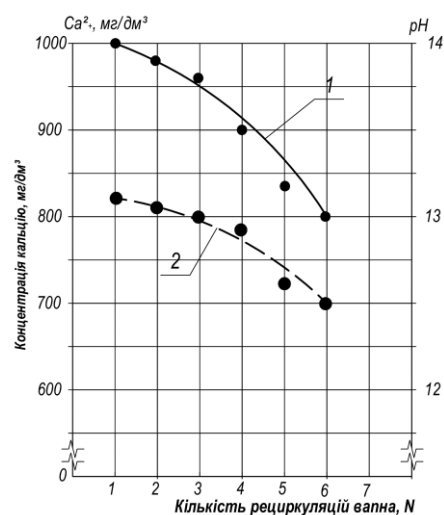


Рис. 11. Графіки залежності концентрації катіонів кальцію (1) та величини рН (2) від кількості рециркуляцій досліджуваного вапняного розчину

Дослідження процесу біосорбції іонів важких металів осадами станцій біологічного очищення підземних вод. Встановлено, що матриксні структури спроможні сорбувати до $2,5 \text{ мг/дм}^3$ іонів Cr^{6+} із природних підземних вод. Доведено (рис. 12, а, б), що ефективність очищення від іонів Cr^{6+} значно вища при використанні «свіжого» ніж «ущільненого» осаду. Визначено оптимальні концентрації «свіжого» осаду ($400\text{-}500 \text{ мг/дм}^3$) для видалення іонів Cr^{6+} із підземних вод. Визначено залежності ефективності очищення промивних вод гальванічного виробництва від IBM (Cu^{2+} до 16 мг/дм^3 , Zn^{2+} до 50 мг/дм^3 , Ni^{2+} до $1,3 \text{ мг/дм}^3$) в результаті їх сорбції на матриксних структурах від виду технології, типу осаду та його доз. Доведено, що для видалення IBM потрібно застосовувати ступінчасте введення реагенту-осаджувача з дозою 300 мг/дм^3 на кожному із ступенів. Показано, що для вилучення IBM із промивних і природних вод найбільш ефективним та рентабельним є застосування «свіжого» осаду. Розроблено технологію очищення води від IBM активованими в постійному магнітному полі *bio*-мінералами.

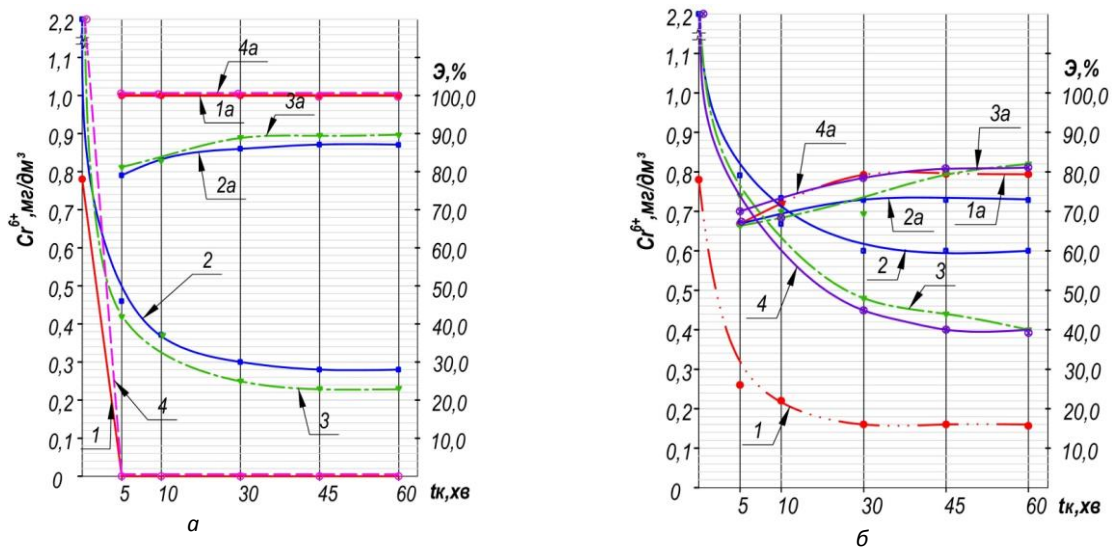


Рис. 12. Кінетика (1 – 4) та ефективність (1а – 4а) вилучення йонів Cr^{6+} із природних вод при концентраціях: а – «свіжого» осаду: 1 – 300 мг/дм³, Cr^{6+} до 1,0 мг/дм³; 2 – 300 мг/дм³, Cr^{6+} 1,0-2,5 мг/дм³; 3 – 400 мг/дм³; 4 – 500 мг/дм³; б – «ущільненого» осаду: 1 – 300 мг/дм³, Cr^{6+} до 1,0 мг/дм³; 2 – 300 мг/дм³, Cr^{6+} 1,0-2,5 мг/дм³; 3 – 400 мг/дм³; 4 – 500 мг/дм³

В розділі 6 наведено результати й аналіз виробничих досліджень розроблених та удосконалених технологій очищення багатокомпонентних підземних вод.

Для очищення агресивних, біля-нейтральних вод із середнім лужним резервом (2,0-4,0 ммоль/дм³), які містять катіони NH_4^+ (до 1,0 мг/дм³), Fe^{2+} (до 5,0 мг/дм³), розчинені органічні речовини (ПО до 6,0 мг O_2 /дм³), феноли (до 0,03 мг/дм³), удосконалено технологію, яка базується на використанні біологічних та фізико-хімічних методів. За технологією в системі водопостачання м. Березне спроектовано та побудовано станцію продуктивністю 2000 м³/добу.

До складу технологічного обладнання станції (рис. 13) входять: біореактор діаметром 2,8 м, висотою 8 м, три відкритих пінополістирольних фільтри розмірами 2,0х2,0х4,3 м, обладнаних системою гідроавтоматичної промивки, електролізна установка «Полум'я-2», насос-дозатор натрій гіпохлориту, блок стабілізаційної обробки фільтрату. Завантаження біореактора складалося із спіненого пінополістиролу марки ПСВ за ОСТ 301-05-92Е, крупністю фракцій та висотою шарів: $\delta=6,0 - 12$ мм; $h=700$ мм; $\delta=3,0 - 6,0$ мм; $h=500$ мм; $\delta=2,0 - 3,0$ м; $h=500$ мм. Шар фракцій $\delta=6,0 - 12$ мм знаходився у незатопленому стані. Завантаження фільтрів – із пінополістиролу крупністю гранул робочого шару $\delta=1,0 - 2,5$ мм, висотою 1000 мм. Результати досліджень комплексного очищення води за запропонованою технологією в умовах коливання питомих гідравлічних навантажень наведено на рис. 14, 15.

Для очищення агресивних, слабокислих вод із величинами гідрокарбонатної лужності 2,0-4,5 ммоль/дм³, перманганатної окисності (до 8,0 мг O_2 /дм³), які містять катіони NH_4^+ (до 3,0 мг/дм³), Fe^{2+} до 20 мг/дм³; $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$ 0,05 – 0,5 мг/дм³ розроблено технологію на основі комбінованих методів: гідродинамічної кавітації – біологічного очищення – коагуляції – фільтрування.

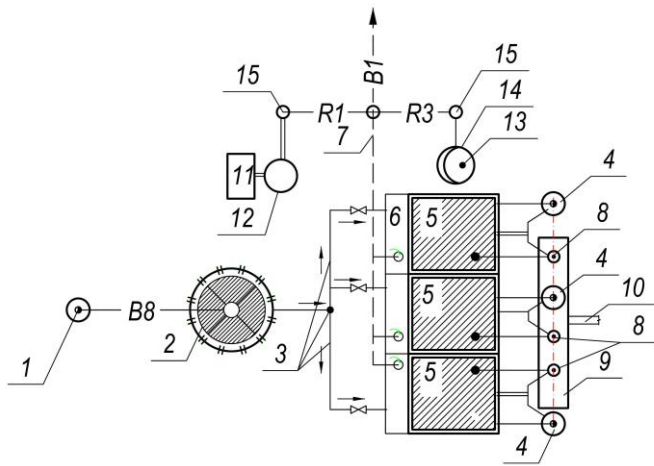


Рис. 13. Технологічна схема водопідготовки агресивних, біля нейтральних вод із середнім лужним резервом:

1 – свердловина; 2 – біореактор; 4 – повітря відділювачі; 5 – фільтри; 6 – кармани збору фільтрату; 8 – гідророботи; 9 – канал збору промивних вод; 10 – трубопровід відведення відпрацьованих промивних вод; 11 – електролізер; 12, 14 – баки розчинів натрій гіпохлориту та $\text{Ca}(\text{OH})_2$; 13 – мішалка; 15 – насоси-дозатори; 3, 7 – технологічні трубопроводи

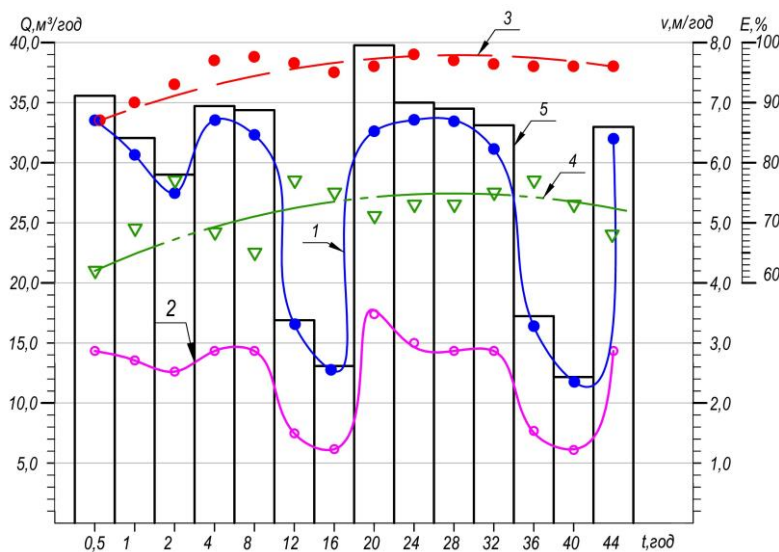


Рис. 14. Зміна погодинних витрат, швидкостей фільтрування та ефективності очищення протягом фільтроциклу: 1 – швидкість у реакторі; 2 – швидкість на фільтрах; 3 – ефективність очищення від $\text{Fe}(\text{II})$ після фільтрів; 4 – ефективність видалення органічних речовин за ПО після фільтрів; 5 – погодинні витрати води

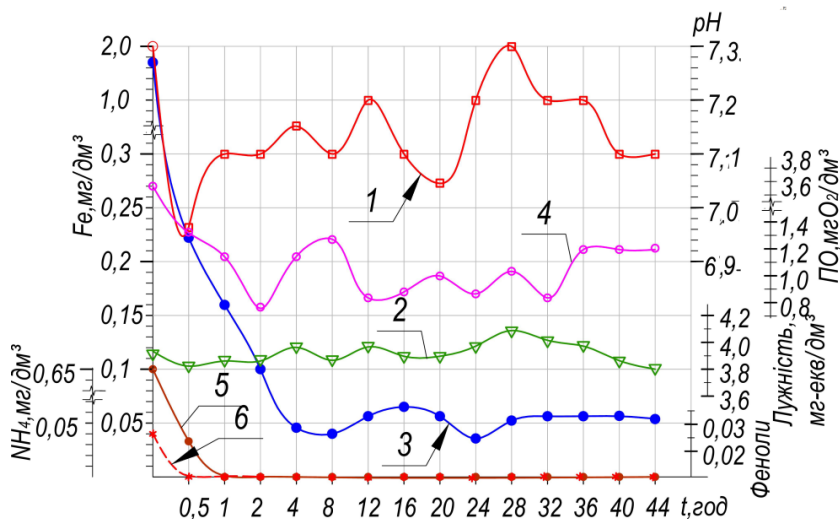


Рис. 15. Зміна параметрів якості очищеної води впродовж фільтроциклу: 1 – величини pH; 2 – гідрокарбонатної лужності; 3 – концентрації $\text{Fe}(\text{II})$; 4 – перманганатної окисності; 5 – концентрації NH_4^+ ; 6 – концентрації фенолів

Для кондиціонування слабокислих ($\text{pH } 6,4 - 6,5$) з низьким лужним резервом ($1,28-1,5 \text{ ммоль/дм}^3$) підземних вод, які характеризуються дуже високим ступенем корозії (до $I_L - 2,0$) та величиною перманганатної окисності (до $6,4 \text{ мг } \text{O}_2/\text{дм}^3$), концентрацією сірководню (до $2,0 \text{ мг/дм}^3$), а також здатністю до сезонних коливань

параметрів якості, зокрема: сполук Fe^{2+} (до $10,0 \text{ мг/дм}^3$), NH_4^+ до $1,8\text{-}2,0 \text{ мг/дм}^3$, фенолів (до $0,06 \text{ мг/дм}^3$), розроблено технологію, яка базується на використанні фізичних та фізико-хімічних методів очищення (рис. 16). Дози реагентів становили: кальцинованої соди $35\text{-}45 \text{ мг/дм}^3$; алюміній гідроксохлориду 20 мг/дм^3 , неіоногенного флокулянту $8\text{-}10 \text{ мг/дм}^3$. Оптимальні швидкості фільтрування в межах $3\text{-}5 \text{ м/год}$ залежно від якості води. Тривалість фільтроцикла складала в середньому 12 годин (рис. 17). Технологію впроваджено в системі водопостачання Балахівського НВК «Колегіум – ЗОШ I-II ступенів» продуктивністю до $100 \text{ м}^3/\text{добу}$.

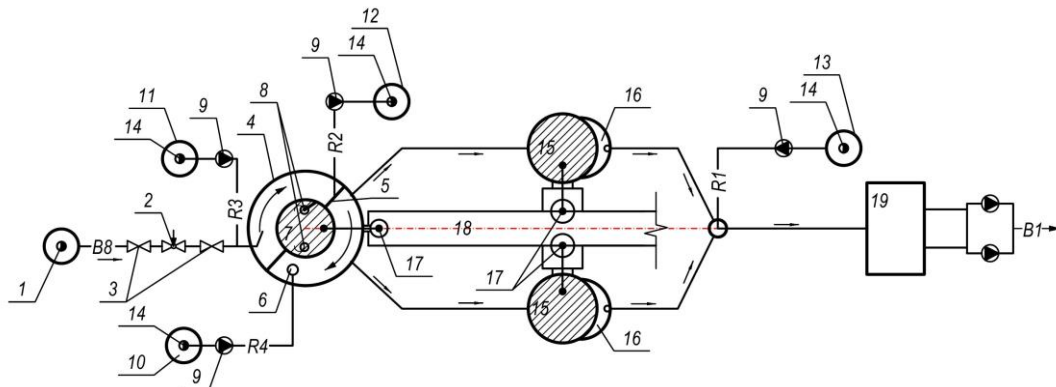


Рис. 16. Технологічна схема очищення та кондиціонування підземних вод: 1 – свердловина; 2 – ежектор (кавітатор); 3 – вентилі; 4 – камера змішувача; 5 – занурена перегородка; 6 – перепускний трубопровід; 7 – контактна колона; 8 – подача води на фільтри; 9 – насоси-дозатори; 10, 11, 12, 13 – витратні баки розчинів: флокулянту, лужного реагенту, коагулянту, натрій гіпохлориту; 14 – мішалки; 15 – фільтри; 16 – збірні кармани; 17 – гідророботи; 18 – відвідний канал; 19 – РЧВ

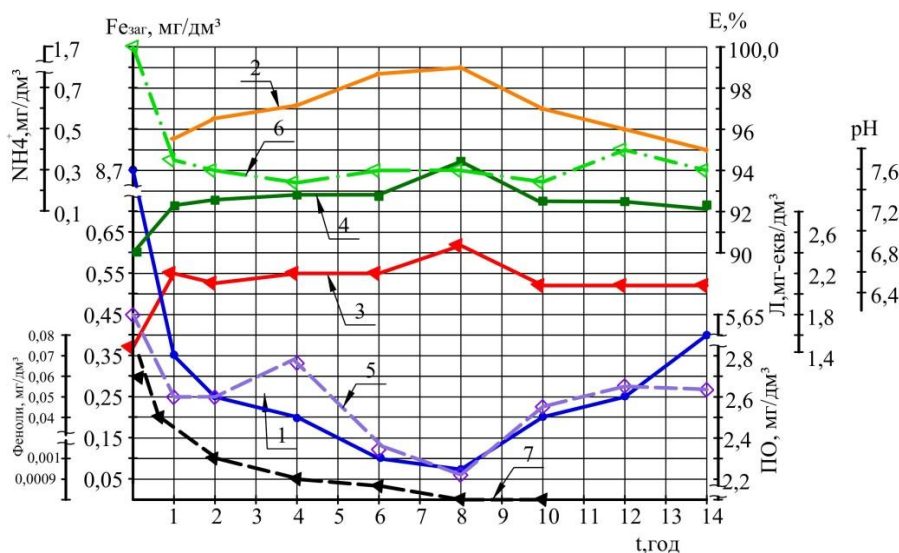


Рис. 17. Зміна концентрації $\text{Fe}(\text{II})$ (1), величин гідрокарбонатної лужності (3), pH (4), перманганатної окисності (5), NH_4^+ (6), фенолів (7), ефективність вилучення $\text{Fe}(\text{II})$ (2) протягом фільтроциклу (тк, год) при очищенні підземної води з входніми концентраціями: NH_4^+ $1,7 \text{ мг/дм}^3$; $\text{Fe}(\text{II})$ $8,7 \text{ мг/дм}^3$; L $1,40 \text{ ммоль/дм}^3$; ПО до $5,65 \text{ мг } \text{O}_2/\text{дм}^3$; фенолів до $0,06 \text{ мг/дм}^3$; величиною pH $6,5$

Удосконалено технологію та апаратне оформлення для кондиціонування агресивних (із надмірно високим ступенем корозії I_L $2,4$), слабокислих підземних

вод із низьким лужним резервом (до $1,0 \text{ ммоль/дм}^3$), забруднених легкоокиснюваними органічними речовинами (до $8 \text{ мг } \text{O}_2/\text{дм}^3$ за ПО), NH_4^+ та H_2S (до 4 мг/дм^3), Fe – ГК комплексами (до 30 мг/дм^3), марганцем (до $0,5 \text{ мг/дм}^3$), фенолами (до $0,03 \text{ мг/дм}^3$) на основі комплексного використання біологічних та фізико-хімічних методів очищення (рис. 18). Технологія дозволяє корегувати наступні параметри системи: рН, гідрокарбонатну лужність, концентрацію неорганічного вуглецю, розчинений кисень, вміст катіонів Ca^{2+} залежно від концентрації пріоритетних забрудників.

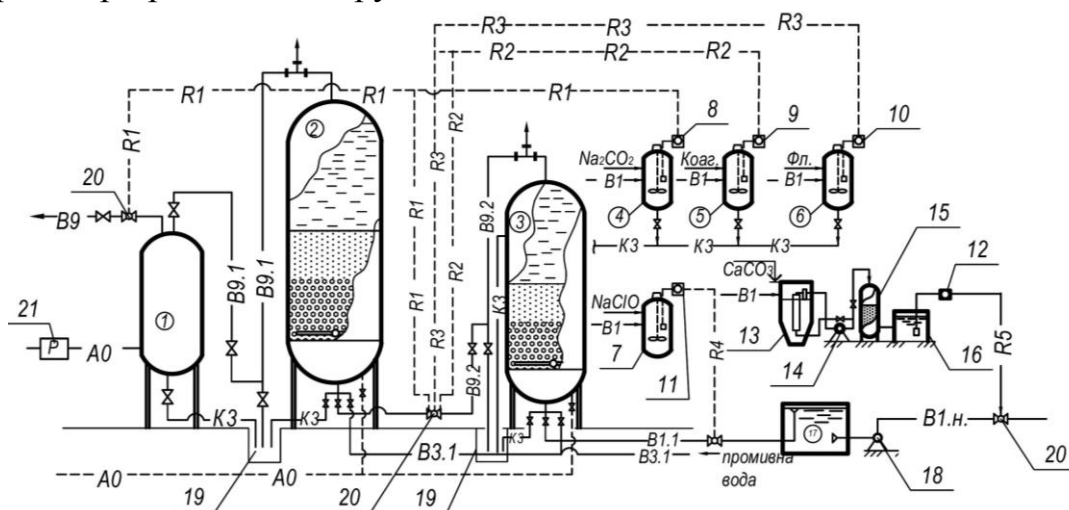
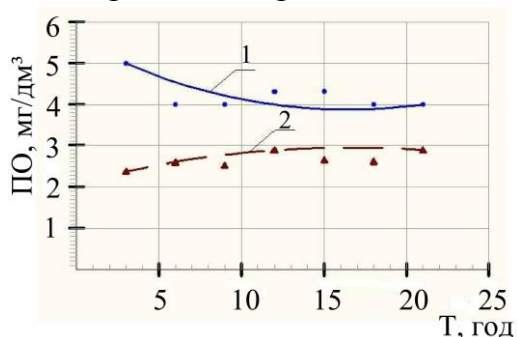
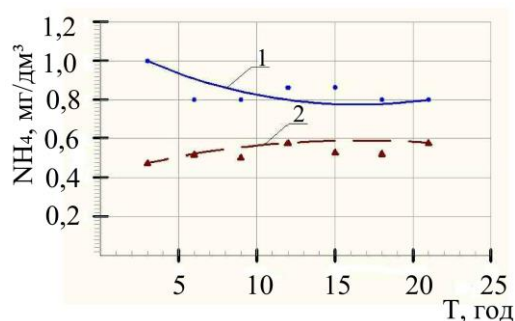


Рис. 18. Технологічна схема кондиціонування підземних вод: 1 – напірний аераційний змішувач; 2 – фільтр I-го ступеня (біореактор); 3 – фільтр II-го ступеня; 4, 5, 6, 7 – блоки приготування та дозування, відповідно, розчинів кальцинованої соди, коагулянту, флокулянту, натрій гіпохлориту; 8-12 – насоси-дозатори; 13 – гідралічний змішувач для приготування вапняного розчину; 14 – циркуляційний насос; 15 – фільтр; 16 – витратний бак освітленого вапняного розчину; 17 – РЧВ; 18 – НС II; 20 – змішувачі; 21 – ротаметр

При концентраціях катіонів NH_4^+ $1,0\text{--}3,0 \text{ мг/дм}^3$ рекомендовано використовувати підлучення води після фільтра 1-го ступеня (рис. 19). Швидкості фільтрування становили: на фільтрах I-го ступеня – 3 м/год ; на фільтрах II-го ступеня $5\text{--}6 \text{ м/год}$. Введення коагулянту передбачали у сезони з підвищеним вмістом розчинених органічних речовин.



а



б

Рис. 19. Зміна показників перманганатної окиснюваності (а) та концентрацій амонійного нітрогену (б) протягом фільтроциклу: 1 – після фільтра I-го ступеня; 2 – після фільтра II-го ступеня (без використання реагентів). Величини перманганатної окиснюваності та вмісту амонійного нітрогену у вхідній воді відповідно: $6,56 \text{ мг } \text{O}_2/\text{дм}^3$ та $1,8\text{--}3,0 \text{ мг/дм}^3$

Технологію впроваджено в робочий проект реконструкції станції водоочищення в Рівненській області продуктивністю 300 м³/добу у 2012 році.

Для кондиціонування нейтральних підземних вод з підвищеними показниками лужності (більше 7 ммоль/дм³), каламутністю до 15 мг/дм³, середньою кольоровістю (до 55 град. ПКШ), концентраціями сірководню (до 2,0 мг/дм³), катіонів NH₄⁺ (до 5,5 мг/дм³), Fe²⁺ (2,0-5,4 мг/дм³), БСК₅ (до 5,0 мг O₂/дм³), розроблено технологію, яка базується на застосуванні фізико-хімічних методів очищення, заснованих на фазово-дисперсному перетворенні домішок із наступним розділенням фаз (рис. 20).

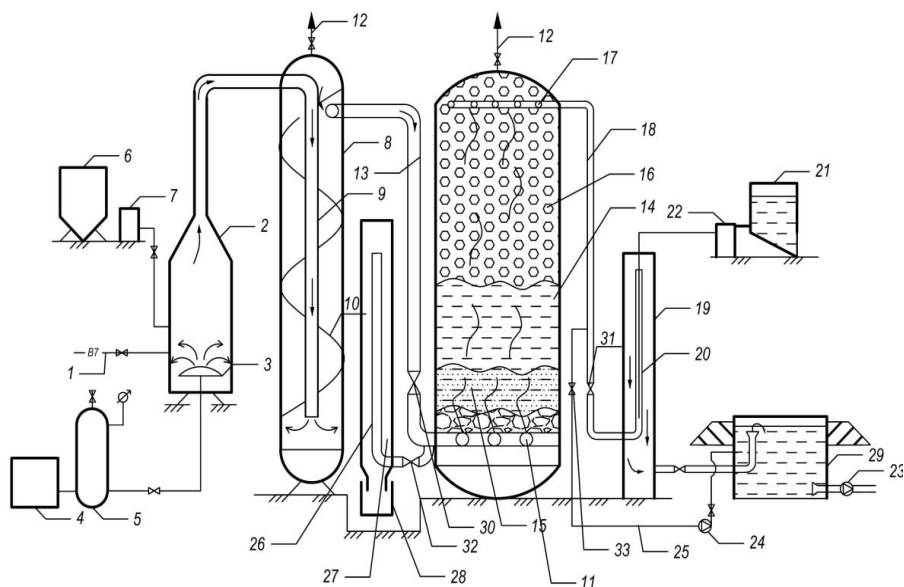


Рис. 20. Технологічна схема станції водоочищення м. Устилуг: 1 – подача вхідної води; 2 – аераційний апарат; 3 – дисковий аератор «АКВА-ПЛАСТ»; 4 – компресор; 5 – бак-ресивер; 6, 21 – витратні баки коагулянту та натрій гіпохлориту; 7, 22 – насоси-дозатори; 8 – змішувач гідромеханічного типу з центральною трубою (9); 10 – гвинтоподібні лопати; 11, 17 – нижня та верхні дренажні системи; 12 – запобіжні клапани; 14 – напірний фільтр з пінополістирольним завантаженням (16); 15 – шар осаду; 19 – колона постійного рівня; 23 – насос 2-го підйому; 24 – промивний насос; 26, 27 – система промивки фільтра; 28 – канал відпрацьованих промивних вод; 29 – РЧВ

Встановлено, що сумісна обробка води накопиченим у контактній колоні осадом ферум(III) гідроксиду з розчином алюміній гідроксохлориду (D_k 20 мг/дм³) та цеоліту (1 г/м³) дозволяють вилучати з води розчинені органічні сполуки та амонійний нітроген. Технологію впроваджено на станції водоочищення м. Устилуг продуктивністю 300 м³/добу.

Для очищення агресивних (із легким ступенем корозії I_L до -0,5) нейтральних (рН 6,8 – 7,05), твердих (до 10 ммоль/дм³) із підвищеним лужним резервом (6,7-7,8 ммоль/дм³) та незначним вмістом органічних речовин за ПО (від 1,6 до 4,5 мг O₂/дм³) підземних вод які містять агресивний карбон(IV) оксид (до 35 мг/дм³), сірководень (до 1,0 мг/дм³), катіони Fe(II) до 4,0 мг/дм³ розроблено технологію (за ТУ У 28.2-32936411-011:2013), яку впроваджено в робочий проект станції очищення підземних вод м. Корець продуктивністю 100 м³/добу.

Для станцій продуктивністю до 10000 м³/добу розроблено технологію та апаратне оформлення блоку стабілізаційної обробки, впровадженого на

водозабір «Південний» м. Нововолинськ Волинської області. За параметрами якості води характеризуються легким ступенем корозії ($I_L - 0,32$), табл. 2.

Технологічна схема (рис. 21) включала розчинні баки, освітлювачі-рециркулятори, ємності збору відпрацьованого вапняного розчину, три групи насосів, допоміжне обладнання.

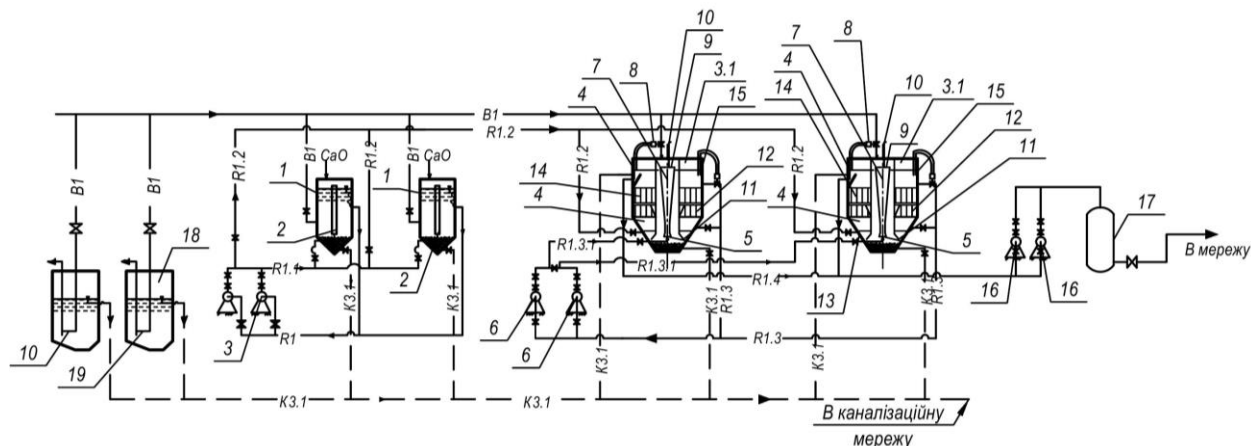
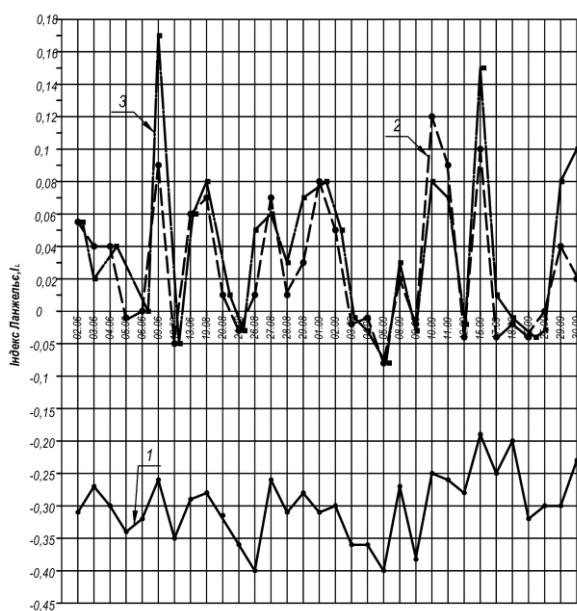


Рис. 21. Технологічна схема вузла стабілізаційної обробки води: 1 – розчинні баки; 2 – гідралічні мішалки; 3 – циркуляційні насоси розчинних баків; 4 – освітлювачі-рециркулятори; 5 – водоструминний насос; 6 – насоси для рециркуляції робочого розчину; 7 – вертикальний вихровий змішувач; 8 – подача вхідної води; 9 – повітря-відділювач; 10 – скид надлишкового повітря; 11 – система розподільчих труб; 12, 14 – блоки тонкошарових відстійників; 13 – зона накопичення осаду; 15 – ємність освітленого розчину; 16 – насоси-дозатори; 17 – освітлювальний фільтр; 18 – шламозбірники; 19 – гідроелеватори



Результати досліджень змін параметрів індексів стабільності води в напірних водоводах наведено на рис. 22.

Рис. 22. Зміни параметрів стабільності води за індексом Ланжелє протягом досліджуваного періоду: 1 – вихідної води; стабілізованої води в напірних водоводах: 2 – № 1; 3 – № 2

Впроваджена технологія та обладнання дозволяли постійно підтримувати нейтральний рівень стабільності води у системі водопостачання міста, не зважаючи на зміни параметрів якості води та величин витрат. Цьому сприяла конструкція освітлювачів-рециркуляторів із системою автоматики, яка

дозволяла контролювати величину рН робочого розчину, рівні робочого розчину у баках, ступінь відкриття-закриття засувки на технологічних трубопроводах, включення-виключення циркуляційних насосів та насосів-дозаторів залежно від режимів роботи основного обладнання. Контролери рівня рН дозволяли регулювати витрату насосів-дозаторів залежно від витрат насосної станції II підйому.

За результатами досліджень визначені оптимальні концентрації лужного реагенту як для нарощування захисної карбонатної плівки на внутрішній поверхні напірних

водоводів (37-40 мг/дм³), так і для підтримання параметрів якості води у стабільному стані (20-23 мг/дм³). Визначено співвідношення витрат води від НС II та освітленого робочого розчину $\text{Ca}(\text{OH})_2$, які знаходилися в межах 30-33 м³/год води на 1 м³/год освітленого розчину.

Всі наведені в розділі технології підтверджено актами впровадженень проектних та експлуатаційних організацій.

В сьомому розділі наведено техніко-економічне порівняння варіантів технологій та обладнання станцій водоочищення, які працюють за безреагентними схемами: I варіант – за традиційним фізико-хімічним методом спрощена аерація – фільтрування; II варіант – технологію та обладнання станції біологічного очищення підземних вод. На другому етапі як порівняльні варіанти розглядали установку заводського виготовлення для очищення підземних вод, що містять складні форми феруму й органічні комплекси (I базовий варіант), та установку комплексного очищення агресивних слабокислих підземних вод з низьким лужним резервом, які містять стійкі колоїдні комплекси, на прикладі очисної станції школи-колегіуму с. Балашівка Рівненської області (II варіант). За результатами проведених техніко-економічних порівнянь базових та запропонованих технологій встановлено, що при незначній різниці у капіталовкладеннях (до 6% за безреагентною та 1,1% за реагентною схемами), спостерігалось зниження експлуатаційних витрат відповідно до 33% на рік та до 42% на рік за запропонованими схемами. Крім того, собівартість 1 м³ очищеної води порівняно з базовими схемами зменшувалася на 0,62 грн/м³ (до 17%) за безреагентною та на 5,1 грн/м³ (до 42%) за реагентними схемами.

ВИСНОВКИ

В роботі вирішено важливу народногосподарську проблему очищення та кондиціонування багатокомпонентних підземних вод, які характеризуються різними показниками ступенів агресивності, лужного резерву, рН, концентрацій різних форм феруму, високомолекулярних сполук природного та антропогенного походження, шляхом встановлення раціональних умов та меж застосування комбінованих, відомих та удосконалених, біологічних та фізико-хімічних методів із використанням синергетичного ефекту, дослідження і впровадження технологій їх комплексного очищення та кондиціонування в умовах сезонних та річних змін показників якості води, нерівномірності гідравлічного навантаження.

1. Запропоновано удосконалений класифікатор технологій очищення природних вод з урахуванням їх багатокомпонентності, на основі якого розроблено системний підхід щодо вибору методів, процесів та апаратів для реалізації водоочисних технологій.

2. Встановлено оптимальні величини гідрокарбонатної лужності (2,0-4,0 ммоль/дм³), а також фактори впливу додаткового джерела неорганічного вуглецю та постійного магнітного поля на ефективність процесів очищення підземних вод; визначені величини напруженості магнітного поля, при яких активується (5-15 мТл), гальмується (130-150 мТл) розмноження мікроорганізмів;

доведено, що мінімальні концентрації розчиненого кисню ($0,5-1,5 \text{ мг/дм}^3$) не є лімітуючим фактором при використанні біохімічного методу очищення слабокислих та біля-нейтральних підземних вод від катіонів Fe^{2+} .

3. Доведено ефективність використання методу гідродинамічної кавітації в поєднанні із процесом коагуляції для деструкції, окиснення та вилучення розчинених у підземних водах гумінових комплексів, фенолів, іонів NH_4^+ .

4. Встановлено, що при кондиціонуванні агресивних слабокислих залізовмісних підземних вод із низьким лужним резервом ($0,6-1,18 \text{ ммоль/дм}^3$), при концентраціях іонів NH_4^+ (до $1,0 \text{ мг/дм}^3$) розчин кальцинованої соди (дозою $50-70 \text{ мг/дм}^3$) необхідно вводити перед біореактором; при концентраціях NH_4^+ від $1,0$ до $3,0 \text{ мг/дм}^3$ – перед фільтрами другого ступеня. Визначено раціональні дози розчину вапняного молока для стабілізаційної обробки води.

5. Встановлено, що при очищенні нейтральних вод з нормальним та підвищеним лужним резервом ($7,8-8,2 \text{ ммоль/дм}^3$), які містять антропогенні домішки для дестабілізації колоїдної системи потрібно застосовувати розчин алюміній гідроксохлориду із концентраціям $20-30 \text{ мг/дм}^3$. Встановлено, що при підвищенні рН до $7,3-7,4$ при очищенні агресивних твердих вод без використання лужних реагентів на інертних наповнювачах досягається стабільність їх властивостей по відношенню до металу.

6. Встановлено, що в біореакторах, при застосуванні неоднорідного контактного завантаження процеси окиснення відбуваються практично рівномірно по всій його висоті до глибини $0,8 \text{ м}$, а ефективність окиснення (при $V=5 \text{ м/год}$) становить $90-92\%$ для Fe (II) , $53-55\%$ для розчиненої органіки та $91-92\%$ для йонів NH_4^+ . Доведено, що при зміні величин гідравлічних навантажень (від 5 до 10 м/год) в межах фільтроциклу процеси очищення води є стабільними.

7. Встановлено, що матриксні структури біо-мінералів спроможні сорбувати ІВМ а саме: до $2,5 \text{ мг/дм}^3$ іонів Cr^{6+} ; до 16 мг/дм^3 Cu^{2+} ; до 50 мг/дм^3 Zn^{2+} ; до $1,3 \text{ мг/дм}^3$ Ni^{2+} . Визначено, що для видалення ІВМ із промивних вод гальванічного виробництва потрібно застосовувати ступінчасте введення реагенту-осаджувача з дозою 300 мг/дм^3 на кожному із ступенів. За результатами спектрального аналізу доведена залежність якісного складу матриксних структур від параметрів якості води та тривалості їх формування, а також можливість сорбції катіонів Al^{3+} , які не вступили у взаємодію із колоїдними частинками при застосуванні для очищення води алюміній гідроксохлориду.

8. Розроблена багатокомпонентна математична модель процесу очищення підземних вод, комп'ютерна реалізація якої дозволяє прогнозувати зміну у часі по глибині контактного завантаження ефективності очищення, величин біомаси бактерій, які розвиваються на матриксних структурах та бактерій, що рухаються з потоком води, маси стаціонарних та рухомих матриксних структур в одиниці об'єму, визначати тривалість ефективної роботи очисної споруди між промивками;

9. Розроблено, досліджено та удосконалено технології комплексної водопідготовки на основі комбінованих методів очищення та кондиціонування:

- агресивних (із дуже високим ступенем корозії $I_L \approx -2,0$) слабокислих підземних вод із низьким лужним резервом (до $1,0 \text{ ммоль/дм}^3$), перманганатною

окисністю (8-12 мг $O_2/дм^3$), кольоровістю (до 70 град. ПКШ), які містять сполуки NH_4^+ (до 4 мг/дм³), Fe – ГК комплекси (до 30 мг/дм³), феноли (до 0,03 мг/дм³), H_2S (до 4 мг/дм³), при можливій присутності катіонів Cr^{6+} до 0,5 мг/дм³ методами: коригування параметрів якості води (гідрокарбонатної лужності, рН, концентрації розчиненого неорганічного вуглецю) розчином кальцинованої соди – аерації – біологічного очищення – коагуляції – фільтрування через інертне та сорбційне завантаження–стабілізаційної обробки – знезараження (продуктивністю від 200 до 2000 м³/добу);

- агресивних ($I_L \approx -1,5 \dots -2,0$), слабокислих підземних вод з низьким лужним резервом (до 1,5 ммоль/дм³), кольоровістю (до 50 град. ПКШ), величиною перманганатної окисності (до 6,4 мг $O_2/дм^3$), які містять сполуки NH_4^+ (до 2,0 мг/дм³), феноли (0,06-0,5 мг/дм³), Fe – ГК комплекси (до 10,0 мг/дм³), H_2S (до 2,0 мг/дм³) методами: коригування параметрів якості води (гідрокарбонатної лужності, рН, концентрації розчиненого неорганічного вуглецю) розчином кальцинованої соди – аерації/гідродинамічної кавітації – контактної коагуляції – фільтрування – реагентної стабілізаційної обробки – знезараження (продуктивністю до 200 м³/добу);

- нейтральних агресивних вод (які проявляють тенденцію до корозії ($I_L \approx -0,5$), із величиною перманганатної окисності (до 6,0 мг $O_2/дм^3$), які містять сполуки феруму (до 5,0 мг/дм³), NH_4^+ (до 1,0 мг/дм³), феноли (до 0,03 мг/дм³) методами: аерації – біологічного очищення – фільтрування – реагентної стабілізаційної обробки – знезараження (продуктивністю від 1000 до 10000 м³/добу);

- нейтральних підземних вод із індексом стабільності (I_L до -1,0), величинами гідрокарбонатної лужності (6,7-7,8 ммоль/дм³), загальної твердості (до 10 ммоль/дм³), перманганатної окисності (до 5,0 мг $O_2/дм^3$), H_2S (до 1,0 мг/дм³), Fe^{2+} (до 4,0 мг/дм³) у присутності фенолів (до 0,05 мг/дм³) методами: аерації/гідродинамічної кавітації – фільтрування через інертне завантаження – фільтрування частини потоку води через активні наповнювачі – знезараження (продуктивністю до 200 м³/добу);

- нейтральних вод із кольоровістю (до 55 град. ПКШ), запахом (до 4 балів), каламутністю до 15 мг/дм³, гідрокарбонатною лужністю (7,0-8,5 ммоль/дм³), ПО до 7,0 мг $O_2/дм^3$, вмістом катіонів NH_4^+ (до 5,5 мг/дм³), Fe^{2+} (до 6,0 мг/дм³), величинами БСК до 5,0 мг $O_2/дм^3$ H_2S (до 2,0 мг/дм³), методами: аерації/гідродинамічної кавітації – контактної коагуляції – фільтрування через інертне та сорбційне завантаження – знезараження (до 1000 м³/добу);

- технологію та апаратурне оформлення блоку стабілізаційної обробки підземних агресивних вод для станцій продуктивністю до 10000 м³/добу.

10. Запропоновані технології впроваджено при розробці робочих проектів і будівництві станцій водоочищення та стабілізаційної обробки води в населених пунктах с. Балашівка (Балашівського НВК "Колегіум – ЗОШ I-II ступенів), м. Березне Рівненської області, м. Устилуг та м. Нововолинськ Волинської області, а також в робочих проектах станцій водоочищення м. Корець, смт Рокитне, с. Старе Село Рівненської області, автотранспортного цеху Рівненської АЕС. Впроваджені технології дозволяють зменшити собівартість 1 м³ очищеної води порівняно з

традиційними на 0,62 грн/м³ (до 17%) за безреагентною та на 5,1 грн/м³ (до 42%) за реагентними схемами.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України

1. Квартенко А. Н., Романенко Т. В. Технология многопроцессной очистки высокоцветных природных вод с повышенным содержанием органических веществ и железа. *Гідротехнічні споруди і гідромеліорація*. Рівне, УДУВГП, 2002. Випуск 27. С. 214–221. (Здобувачу належить розробка технології, постановка та проведення досліджень, обробка їх результатів).
2. Квартенко О. М. Дослідження можливостей попередньої біологічної очистки природних вод, які зазнали підвищеного техногенного навантаження. *Вісник НУВГП. Збірник наукових праць*. Рівне, 2006. Випуск 2 (34). Частина 1. С. 142–150.
3. Квартенко О. М. Технології очищення та кондиціонування підземних вод різного фізико-хімічного складу. *Вісник НУВГП. Технічні науки. Збірник наукових праць*. Рівне, 2007. Випуск 4 (40). Частина 2. С. 441–446.
4. Квартенко О. М. Дослідження впливу постійного магнітного поля на динаміку процесу очистки природних вод іммобілізованою мікрофлорою. *Вісник НУВГП. Технічні науки. Збірник наукових праць*. Рівне, 2008. Випуск 3 (43). С. 203–211.
5. Квартенко А. Н. Исследование биотропных параметров постоянного магнитного поля на сообщества микроорганизмов. *Гідромеліорація та гідротехнічне будівництво*. Збірник наукових праць. Рівне, 2008. Випуск 33. С. 134–142.
6. Квартенко А. Н. Железобактерии в подземных водах Украины и их роль в окислении соединений железа и марганца. *Гідромеліорація та гідротехнічне будівництво*. Збірник наукових праць. Рівне : Національний університет водного господарства та природокористування, 2009. Випуск 34. С. 180–186.
7. Квартенко А. Н. Теоретические предпосылки комплексного влияния переменного магнитного поля на процессы очистки подземных вод, содержащих железо-гуминовые соединения. *Вісник НУВГП. Технічні науки. Збірник наукових праць*. Рівне : НУВГП, 2010. Випуск 3 (51). С. 72 – 79.
8. Квартенко А. Н. Многопроцессная технология кондиционирования подземных вод, содержащих комплексорганические и азот аммонийные соединения. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. Науково-технічний збірник. Київ : КНУБА, 2010. Випуск 14. С. 42–55.
9. Квартенко А. Н. Характеристика подземных вод Северо-Западных областей Украины и технологические схемы их кондиционирования. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. Науково-технічний збірник. Київ : КНУБА, 2011. Вип. 16. С. 32–40.
10. Квартенко А. Н. Кондиционирование низкощелочных подземных вод, содержащих железогуминовые комплексы. *Науковий вісник будівництва*. Харків : ХДТУБА, 2011. Випуск 63. С. 406–414.

11. Квартенко О. М. Дослідження процесів знезалізнення підземних вод на фільтрах з різноманітними наповнювачами. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. Науково-технічний збірник. Київ : КНУБА, 2013. Випуск 22. С. 44–54.

12. Квартенко А. Н. Технология кондиционирования агрессивных подземных вод с низким щелочным резервом, содержащих аммиак и железоорганические комплексы. *Вісник Донбаської національної академії будівництва та архітектури*. Збірник наукових праць. Макіївка, 2013. Випуск 2013-5 (103). С. 52–59.

13. Квартенко О. М., Сафонов Р. В. Аналіз ступеня агресивності підземних вод Рівненської області. *Вісник НУВГП. Технічні науки*. Збірник наукових праць. Рівне, 2015. Випуск 1(69). С. 49–57. (Здобувачем виконано багаторічний моніторинг та виявлено фактори, які впливають на підвищення ступеня агресивності води в регіоні, проведено розрахунки індексів стабільності води в системах водопостачання населених пунктів Рівненської області).

14. Kvartenko A., Galanov V., Pletuk O. Technology of de-ironing of weakly acidic low alkaline underground water containing ammonium nitrogen. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. 5/10 (83). P. 4–11 <https://DOI:10.15587/1729-4061.2016.79770> (**Індексується у базах: BASE, Ulrich's Periodicals Directory, CiteFactor, ResearchBid, Index Copernicus, РИНЦ, Polish Scholarly Bibliography, Scopus**) (Здобувачу належать розробка технології, апаратів, проведення багаторічних експериментальних досліджень в умовах сезонної зміни якості води, теоретичне обґрунтування отриманих результатів досліджень).

15. Квартенко О. М. Удосконалений класифікатор технологій кондиціонування багатокомпонентних підземних вод. *Вісник Інженерної академії України*. 2017. Вип. 2. С. 131–136.

16. Квартенко О. М. Шляхи інтенсифікації методів очищення багатокомпонентних підземних вод. *Технічні науки та технології* : науковий журнал. Чернігів : ЧНТУ, 2017. № 3 (9). С. 206–212. [https://DOI:10.25140/2411-5363-2017-3\(9\)-206-212](https://DOI:10.25140/2411-5363-2017-3(9)-206-212) (**Індексується у базах: Index Copernicus, Google Scholar, РИНЦ, Research Bib**)

17. Квартенко О. М. Технологія та обладнання вузла стабілізаційної обробки агресивних підземних вод. *Комунальне господарство міст*. Серія : *Технічні науки та архітектура*. 2017. X. : Харківський національний університет ім. О.М. Бекетова. Вип. 139. С. 161–166.

18. Квартенко О. М. Саблій Л.А. Дослідження роботи станції очищення багатокомпонентних підземних вод в умовах змін гідравлічних навантажень. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. Науково-технічний збірник. Київ : КНУБА, 2017. Випуск 28. С. 170–176. (Здобувачу належать постановка завдань та проведення досліджень на діючій станції водоочищення, побудованій за технологією, запропонованою здобувачем, а також вивчення кінетики виносу забруднень при різних умовах промивки фільтруючого завантаження).

19. Квартенко О., Присяжнюк І. Моделювання кінетики процесу видалення сполук заліза в біореакторі. *Технічні науки та технології*: науковий журнал. Чернігів : ЧНТУ, 2017. № 4 (10). С. 247–254. [https://DOI:10.25140/2411-5363-2017-4\(10\)-247-254](https://DOI:10.25140/2411-5363-2017-4(10)-247-254). (**Індексується у базах: Index Copernicus, Google Scholar, РИНЦ, ResearchBib**) (Особистий внесок здобувача – проведення теоретичного аналізу існуючих моделей, розробка фізичної та математичної моделей).

20. Kvartenko O., Gryuk I., Sabliy L. Model of biomineralization of ferrum compounds by *Gallionella* cells immobilized on contact loading of bioreactor. *Energy Engineering and Control Systems*. 2017. Vol. 3. No. 2. P. 51–56. <https://doi.org/10.23939/jeecs2017.02.051>.

(Індексується у базах: CrossRef, ICI Journals Master List) (Особистий внесок здобувача – проведення теоретичного аналізу, розробка моделі процесів внутрішньоклітинного метаболізму бактерій *Gallionella*, при використанні додаткового джерела карбону у вигляді кальцинованої соди).

21. Квартенко О. М. Системний підхід до обґрунтування нових та удосконалення існуючих технологій кондиціонування багатокомпонентних підземних вод. *Комунальне господарство міст*. Серія : *Технічні науки та архітектура*. 2018. X. : Харківський національний університет ім. О.М.Бекетова. Вип. 140. С. 98–103.

22. Квартенко О. М. Встановлення оптимальних параметрів процесу стабілізаційної обробки підземних вод в системах водопостачання малих населених пунктів. *Вісник НУБГП. Технічні науки*. Збірник наукових праць. Рівне, 2017. Випуск 4(80). С. 35–41.

23. Квартенко О. М., Саблій Л. А., Грюк І. Б. Вилучення фенолів із багатокомпонентних підземних вод методом гідродинамічної кавітації. *Вісник Хмельницького національного університету*. Серія : *Технічні науки*. Хмельницький : Хмельницький національний університет, 2017. № 5 (253). С. 83–88. **(Індексується у базах Google Scholar, Index Copernicus, РИНЦ, Polish Scholarly Bibliography)** (Здобувачу належать проведення теоретичного аналізу, постановка завдань, розробка методик та пілотної установки, проведення досліджень, а також теоретичне обґрунтування отриманих результатів).

24. Kvartenko A., Orlov V., Pletuk O. Research into the biosorption process of heavy metal ions by the sediments from stations of biological iron removal. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. 4/10 (88). P. 37–43. <https://DOI:10.15587/1729-4061.2017.106961>. **(Індексується у базах: BASE, Ulrich's Periodicals Directory, CiteFactor, ResearchBid, Index Copernicus, РИНЦ, Polish Scholarly Bibliography, Scopus)** (Здобувачу належать ідея використання матриксних структур залізобактерій в якості реагентів осаджувачів іонів важких металів, розробка пілотних установок, технології, проведення експериментальних досліджень та теоретичне обґрунтування отриманих результатів).

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав

25. Журба М. Г., Говорова Ж. М., Квартенко А. Н., Говоров О. Б. Биохимическое обезжелезивание и деманганация подземных вод. *Водоснабжение и санитарная техника*. Москва, 2006. № 9. С. 17–23. (Здобувачу належить розробка технології та апаратів комплексного очищення підземних вод, визначення оптимальних умов проходження процесу, проведення експериментальних досліджень).

26. Журба М. Г., Квартенко А. Н. Биотехнология предварительной очистки поверхностных вод. *Экология и промышленность России*. Москва, 2007. № 4. С. 27–31. (Особистий внесок здобувача – розробка комплексної технології очищення води від розчинених органічних речовин та азоту амонійного, проведення експериментальних досліджень, теоретичне обґрунтування отриманих результатів).

27. Квартенко А. Н., Журба М. Г. Активация биофлокуляционных процессов водоподготовки в постоянном магнитном поле. *Вода: химия и экология*. 2009. № 3. С. 20–27. URL: <http://watchemec.ru/article/16990/>. (*Здобувачу належать ідея, постановка завдань та проведення експериментальних досліджень*).

28. Квартенко А. Н., Журба М. Г. Теоретическое обоснование кондиционирования подземных вод сложного физико-химического состава в постоянном магнитном поле. *Вода: химия и экология*. 2010. № 11. С. 24–32. URL: <http://watchemec.ru/article/4006/>

(*Здобувачу належать теоретичне обґрунтування та проведення досліджень кондиціонування багатоконпонентних підземних вод у постійному магнітному полі, розробка конструкції реактора та технологічної схеми*)

29. Журба М. Г., Говорова Ж. М., Говоров О. Б., Квартенко А. Н. Биореакторы-фильтры с плавающей загрузкой в технологиях кондиционирования подземных вод. *Сантехника*. 2012. № 3. С. 50–54. (*Особистий внесок здобувача – розробка технології та конструкції блочно-модульної установки для видалення важкоокиснюваних феруморганічних комплексів, фульвокислот, фенолів*).

30. Журба М. Г., Говорова Ж. М., Говоров О. Б., Квартенко А. Н. Биореакторы-фильтры с плавающей загрузкой в технологиях кондиционирования подземных вод. *Сантехника: водоснабжение и инженерные системы*. 2012. № 4. С. 50–53. (*Особистий внесок здобувача – розробка концепції комплексного використання удосконалених методів очищення*).

31. Журба М. Г., Говорова Ж. М., Говоров О. Б., Квартенко А. Н. Кондиционирование подземных вод многокомпонентного физико-химического состава. *Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение*. 2012. № 4 (52). С. 18–26. (*Здобувачеві належить розробка принципу багатопроцесного очищення складних підземних вод, який базується на комплексі біологічних та фізико-хімічних методів з наступним коригуванням параметрів її стабільності, а також технологічних схем очищення води від важкоокиснювальних залізоорганічних комплексів, амонійного нітрогену, фенолів*).

32. Квартенко А. Н., Говорова Ж. М. Модернизированные технологии комплексного кондиционирования подземных вод. *Вестник МГСУ*. Научно-технический журнал. М. : Издательство ФГБОУ ВО «Научный исследовательский Московский государственный строительный университет» (МГСУ), 2013. № 5. С. 118–126. (*Здобувачеві належить розробка технології комплексного фізико-хімічного очищення багатоконпонентних підземних вод*).

33. Журба М. Г., Говоров О. Б., Говорова Ж. М., Квартенко А. Н. Исследования и опыт внедрения инновационных технологий кондиционирования подземных вод. *Водоснабжение и санитарная техника*. М. : ООО «Издательство ВСТ» 2014. № 9. С. 38–46. (*Особистий творчий внесок здобувача – участь у розробці та впровадженні технологій кондиціонування підземних вод*).

Патенти України на винахід

34. Спосіб біологічного очищення природних і стічних вод : патент на винахід 55767 Україна: МПК C02F 3/10, C02F 1/48 / Квартенко О. М., власник Квартенко О. М. № 2002064737; заявл. 10.06.2002; опубл. 17.07.2006. Бюл. № 7. 3 с.

35. Спосіб очистки підземних вод від стійких форм органічних та залізоорганічних сполук : патент на винахід 107844 Україна : МПК C02F 1/64, C02F 1/52, C02F 1/72, C02F 9/14 / Квартенко О. М. ; власник Квартенко О. М. № а 2013 02538; заявл. 28.02.2013; опубл. 25.02.2015 Бюл. № 4. 7 с.

36. Спосіб очищення води від іонів важких металів активованими біомінералами : пат. на винахід 115496 Україна : МПК C02F 1/62, C02F 1/48, C02F 3/34 / Квартенко О. М. Плетюк О. В.; власники Квартенко О. М., Плетюк О. В. № а 2016 04551; заявл. 25.04.2016; опубл. 10.11.2017. Бюл. № 21. 7 с. *(Здобувачеві належать ідея винаходу, проведення досліджень, які підтверджують ефективність використання технології, формування формули винаходу, розробка технології).*

37. Установка для комплексного очищення багатокомпонентних підземних вод: пат. на винахід 116716 Україна: МПК C02F 1/64, C02F 1/24, C02F 1/28, C02F 1/52, C02F 1/48, C02F 9/04, C02F 9/08, B01D 21/00, B01D 24/00, B01D 25/00 / Квартенко О. М.; власник Квартенко О. М. № а 2016 10751; заявл. 26.10.2016; опубл. 25.04.2018 Бюл. № 8. 7 с.

Патенти України на корисну модель

38. Спосіб очищення слабокислих підземних вод з низьким лужним резервом : пат. на корисну модель 79151 Україна: МПК C02F 1/64, C02F 1/66 / Квартенко О. М.; власник Квартенко О. М. № u 2012 12591; заявл. 05.11.2012; опубл. 10.04.2013. Бюл. № 7. 4 с.

39. Спосіб очищення підземних вод від сполук заліза : пат. на корисну модель 80341 Україна: МПК C02F 1/64, C02F 3/00, C02F 7/00 / Квартенко О. М. ; власник Квартенко О. М. № u 2012 13456; заявл. 26.11.2012; опубл. 27.05.2013 Бюл. № 10. 5 с.

40. Напірна установка для знезалізнення води : пат. на корисну модель 84017 Україна: МПК C02F 1/64 / Квартенко О. М., Плетюк О. В.; власник Національний університет водного господарства та природокористування. № u201303938; заявл. 01.04.2013; опубл. 10.10.2013. Бюл. № 19. 5 с. *(Здобувачеві належить формування формули винаходу, розробка технологічних вузлів запропонованого пристрою).*

41. Напірна установка для знезалізнення води: патент на корисну модель 112564 Україна : МПК C02F 1/64 / Квартенко О. М., Плетюк О. В.; власник Національний університет водного господарства та природокористування. № u201605623; заявл. 25.05.2016; опубл. 26.12.2016. Бюл. № 24. 5 с. *(Здобувачеві належить формування ідеї та формули винаходу, розробка технологічних вузлів.)*

Статті у інших наукових виданнях

42. Журба М. Г., Говорова Ж. М., Квартенко А. Н. Влияние техногенной составляющей на качество природной воды и выбор технологических схем водоподготовки. *Строительство и архитектура. Экспресс информация. Зарубежный и отечественный опыт в строительстве.* Москва 2004. Выпуск 3. Инженерное обеспечение объектов строительства. ВНИИ НТПИ. С. 75–89.

(Особистий творчий внесок здобувача – теоретичний аналіз джерел забруднень природних вод в результаті техногенної діяльності, а також аналіз стану існуючих технологій водоочищення; проведення досліджень та розробка комплексної технології очищення вод від антропогенних забруднень).

43. М. Г. Журба, Ж. М. Говорова, А. Н. Квартенко. Современное состояние и перспективы биологической очистки природных вод / Проблемный доклад. Строительство и архитектура. М. : Изд-во ВНИИНТПИ, 2006. 72 с. (*Здобувачу належать постановка завдань та проведення досліджень щодо комплексного очищення природних вод від азоту амонійного, розчиненої органіки, кольоровості, а також розробка блочно-модульної багатопроцесної установки та проведення теоретичного аналізу процесів водоочищення*).

44. Квартенко О. М. Вплив постійного магнітного поля на інтенсифікацію процесу очистки поверхневого стоку з територій промислових підприємств. *Вісник НУВГП. Технічні науки*. Збірник наукових праць, 2009. Вип. 2(46). Частина 1. С. 216–225.

45. Журба М. Г., Ганбаров Э. С., Говорова Ж. М., Квартенко А. Н. Современные тенденции развития безреагентных водоочистных технологий. *Питьевая вода*, 2009, № (50). С. 2–14. (*Особистий внесок здобувача – розробка та дослідження роботи біореакторів із закріпленою мікрофлорою під дією постійного магнітного поля, а також фільтрувальних систем із гідроавтоматичною промивкою*).

46. Квартенко О. М. Шляхи інтенсифікації методів реагентного знезалізнення підземних вод. *Вісник Одеської Державної Академії будівництва та архітектури*. Одеса : Optimum, 2015. Випуск № 59. С. 56–63.

47. Квартенко О. М., Саблій Л. А. Дослідження методів очищення підземних залізо містких вод від амонійних сполук та аміаку. *Вода і водоочисні технології. Науково-технічні вісті*. 2016. № 1(18). С. 39–49. (*Здобувачу належать розробка технології та проведення досліджень комплексного очищення слабокислих та нейтральних підземних вод, а також теоретичне обґрунтування отриманих результатів*).

48. Квартенко О. М. Інтенсифікація роботи станції знезалізнення слабкислих підземних вод з низьким лужним резервом. *Вісник НУВГП. Технічні науки*. Збірник наукових праць, 2016. Вип. 2(74). С. 205–214.

49. Квартенко О. М. Інтенсифікація роботи станцій знезалізнення води, які працюють в гравітаційному режимі. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. Науково-технічний збірник. Київ : КНУБА, 2016. Випуск 27. С. 155–162.

50. Квартенко О. М. Використання біохімічного методу в сучасних технологіях водоочищення підземних вод (огляд). *Вода і водоочисні технології. Науково-технічні вісті*. 2016. № 2(19). С. 51–65.

51. Kvartenko A. N. Practical stabilization methods of groundwater in North-Western region of Ukraine. *Water Supply and Wastewater Removal: Monografie* / edited by Henryk Sobczuk, Beata Kowalska. Lublin: Politechnika Lubelska, Lublin University of Technology, 2016. P. 107–120.

52. Kvartenko A. N. Research into factors of mutual influence of ground waters quality parameters on choice of water cleansing technologies. *Вода і водоочисні технології. Науково-технічні вісті*. 2017. № 1(21). С. 39–49.

Матеріали та тези доповідей з'їздів, конференцій, семінарів

53. Квартенко А. Н. Блочно-модульная многопроцессная установка кондиционирования природных вод, подвергшихся антропогенному загрязнению.

Сучасні проблеми охорони довкілля, раціонального використання водних ресурсів та очистки природних вод: матеріали міжнародної науково-практичної конференції (14-17 квітня 2003, м. Миргород). Миргород, 2003. С. 135–138.

54. Журба М. Г., Квартенко А. Н. Исследования биологической предочистки поверхностных вод на биореакторах с носителями прикрепленных микроорганизмов. Сборник докладов. Часть 1. 7-й Международный конгресс «Вода. Экология и технология» 30.05-2.06. Москва, 2006. С. 506–507. (*Особистий внесок здобувача полягає у проведенні експериментальних досліджень щодо попереднього біологічного очищення природних вод від підвищених концентрацій азоту амонійного, БСК, хрому*).

55. Квартенко А. Н. Интенсификация технологий очистки подземных вод сложного физико-химического состава. *Актуальні проблеми водного господарства та природокористування: III міжнародна науково-технічна конференція (22-23 жовтня 2009 р., м. Рівне). Рівне : НУВГП, 2009. С. 29–31.*

56. Квартенко А. Н. Влияние антропогенных факторов на ухудшение качества подземных вод. *Проблеми прогнозування та попередження надзвичайних ситуацій природного, природно-техногенного та техногенного походження: матеріали міжнародної науково-практичної конференції (АР Крим, м. Ялта, 5-9 жовтня 2009).*

57. Квартенко А. Н. Роль закрепленной микрофлоры при очистке подземных вод сложного физико-химического состава. *Вода, Экология, Общество: материалы III международной научно-практической конференции (программа и тезисы). (9-11 февраля 2010 г., г. Харьков). Харьков : ХНАГХ, 2010. С. 54–57.*

58. Квартенко А. Н. Использование влияния постоянного магнитного поля для интенсификации технологии очистки подземных вод содержащих железоорганические комплексы. *Водні ресурси. Проблеми раціонального використання, охорони та відтворення : матеріали III науково-практичної конференції (АР Крим, м. Коктебель, 21-25 червня 2010 р.). НППЦ „Екологія. Наука. Техніка”, 2010. С. 75–76.*

59. Квартенко А. Н. Некоторые аспекты теоретических основ комплексной очистки подземных железосодержащих вод с низким щелочным резервом. *Dny vědy – 2011 : materialy VII mezinárodní vědecko-praktická conference. Díl 19. Biologické vědy. Ekologie. Chemie a chemická technologie. (27 května – 05 června 2011 roku) Praha : Publishing House «Education and Science», 2011. С. 47–49.*

60. Журба М. Г., Говорова Ж. М., Говоров О. Б., Квартенко А. Н. Опыт разработки и внедрения новых технологий кондиционирования подземных вод сложного физико-химического состава. *Энергосбережение и энергоэффективность на предприятиях водопроводно-канализационного хозяйства: материалы международной конференции (05-06 июня 2012 г., г. Москва). Москва : МВЦ «Крокус Экспо», 2012. С. 25–26. (Особистий внесок здобувача полягає у розробці та впровадженні технологій кондиціонування підземних вод).*

61. Квартенко А. Н. Теоретические основы использования продвинутой технологии в комплексной очистке многокомпонентных подземных вод подвергшихся антропогенному загрязнению. *Aktualne problemy nowoczesnych – 2012: materialy VIII Miedzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji. (07-15 czerwca 2012 r., Przemysl). Volume 48. Budownictwo i architektura. Przemysl : Nauka i studia, 2012. С. 59–62.*

62. Квартенко О. М., Бугай С. М., Коробка В. С., Кульбачинський Р. І. Аналіз сучасних методів стабілізаційної обробки води в системах господарсько-питного та технічного водопостачання. *Dny vědy – 2013: materialy IX mezinárodní vědecko-praktická*

conference. Dil 32. Matematika. Vystavba a architektura. (27 brezen – 05 dubna 2013 r., Praha). Praha : Publishing House «Education and Science», 2013. С. 102–106. (*Особистий внесок здобувача полягає у проведенні огляду сучасних методів стабілізаційної обробки води*).

63. Квартенко А. Н., Грюк И. Б. Теоретические основы механизмов химических реакций в технологических схемах обезжелезивания слабоокислых, низкощелочных природных вод с использованием щелочных реагентов. Бъдещите изследвания – 2013: материали за IX Международна научна практична конференция (17-25 февруари 2013, София). Т. 30. Здание и архитектура. София : «Бял ГРАД-БГ» ООД, 2013. С. 27–31. (*Особистий внесок здобувача полягає у теоретичному обґрунтуванні ефективності використання методу підлучення в технологічних схемах кондиціонування слабоокислих, залізомістких вод з низьким лужним резервом*).

64. Квартенко А. Н. О новых подходах в области кондиционирования подземных вод сложного физико-химического состава. ЭТЕВК – 2013: сборник докладов Международного Конгресса (1-5 июня 2013г., Украина, Крым, г. Ялта). 2013. С. 143–146.

65. Квартенко А. Н. Новые технологии и оборудование для кондиционирования многокомпонентных подземных вод. *Вода та довкілля* : тези наукової доповіді. Міжнародна науково-практична конференція в рамках IX Міжнародного водного форуму «AQUA UKRAINE - 2013». (5-6 листопада 2013 р., м. Київ). Київ : Міжнародний виставковий центр Україна, 2013. С. 40–41.

66. Квартенко А. Н., Грюк И. Б. Використання іммобілізованої мікрофлори для очищення природних вод, що зазнали антропогенного навантаження. IV – Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю. (Екологія/Ecology - 2013): збірник наукових праць (25-27 вересня 2013 р., м. Вінниця). Вінниця : ВНТУ, 2013. С. 17–19. (*Особистий внесок здобувача полягає у визначенні методів та способів очищення природних вод від сполук антропогенного та природного походження з мінімальним використанням хімічних реагентів*).

67. Квартенко А. Н. Подход к обоснованию выбора технологий кондиционирования многокомпонентных подземных вод. *Технології очищення води – технічні, біологічні та екологічні аспекти* : збірник тез Міжнародної науково-практичної конференції присвяченої пам'яті професора В. Свентославського. (3-5 грудня 2013р., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»). Київ, 2013. С. 26–27.

68. Квартенко О. М. Технології кондиціонування багатокомпонентних підземних вод. *Чиста вода. Фундаментальні, прикладні та промислові аспекти* : матер. III міжнар. наук.-прак. конф. (м. Київ, 28-30 жовтня 2015р.). К. : НТУУ «КПІ», 2015. С. 90–93.

69. Квартенко О. М. Досвід впровадження методу стабілізаційної обробки підземних вод для Північно-Західних областей України. *Водопостачання та водовідведення: проектування, будова, експлуатація, моніторинг* : матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції (4-6 Листопада 2015 р., м. Львів). Представництво Польської академії наук у м. Києві, Україна, Ун-т «Люблінська політехніка», м. Люблін, Польща, Нац. Ун-т «Львівська політехніка», м. Львів, Україна [та ін.]. Львів : ЗУКЦ, 2015. С. 89–91.

70. Квартенко О. М. Технології біологічного знезалізнення підземних вод. *Чиста вода. Фундаментальні, прикладні та промислові аспекти* : матеріали IV міжнар. наук.-прак. конф. (26-28 жовтня 2016 р., м. Київ). К. : НТУУ «КПІ», 2016. С. 100–102.

71. Квартенко О. М. Використання осадів станцій біологічного знезалізнення для осадження іонів важких металів із зворотних стоків гальванічного виробництва. *Екологія. Людина. Суспільство* : матеріали XIX Міжнародної науково-практичної конференції (12-13 травня 2016 р., м. Київ). Київ : НТУУ «КПІ», 2016. С. 93–94.

72. Квартенко О. М. Інтенсифікація безреагентних методів знезалізнення підземних вод. *Ресурсосбережение и энергоэффективность инженерной инфраструктуры урбанизированных территорий и промышленных предприятий* : матеріали II міжнародної науково-технічної інтернет-конференції (2-27 лютого 2016 г., г. Харків). Харків : ХНУГХ ім. А.Н. Бекетова, 2016. С. 26–28.

73. Квартенко О. М. Саблій Л. А. Комплексна технологія очищення багатокомпонентних підземних вод та утилізації осаду від промивки фільтрів. *Чиста вода. Фундаментальні, прикладні та промислові аспекти* : матеріали V міжнар. наук.-прак. конф. (26-27 жовтня 2017 р., м. Київ). К. : Видавничий дім «КІЙ», 2017. С. 119–121. (Особистий внесок здобувача полягає у розробці та впровадженні безреагентної технології очищення підземних вод з утилізацією осаду від промивки фільтрів в якості реагенту-осаджувача іонів важких металів).

74. Квартенко О. М. Шляхи інтенсифікації методів очищення багатокомпонентних підземних вод. *Актуальні проблеми енерго-ресурсозбереження та екології* : матеріали міжнар. наук.-техн. конф. (10-11 жовтня 2017 р., м. Одеса). Одеса : ОДАБА, 2017. С. 84–86.

75. Квартенко О. М., Саблій Л. А. Досвід впровадження технологій очищення підземних залізовмістних вод для північно-західних областей України *Водопостачання та водовідведення: проектування, будова, експлуатація, моніторинг* : матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції (18-20 жовтня 2017 р., м. Львів, Національний університет "Львівська політехніка"). Львів : ЗУКЦ. С. 75–77. (Особистий внесок здобувача полягає у розробці та впровадженні технологій очищення підземних залізомістких вод із різною кислотністю та лужним резервом від азоту амонійного, фенолів, розчиненої органіки, які дозволяють коригувати фізико-хімічних показники якості води).

АННОТАЦІЯ

Квартенко О.М. Розвиток наукових засад удосконалення технологій очищення багатокомпонентних підземних вод. – На правах рукопису.

Дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.17.21 – технологія водоочищення. – КПІ, Київ, 2019.

Запропоновано напрям розвитку наукових засад із обґрунтуванням методології і механізмів комплексного очищення та кондиціонування багатокомпонентних підземних вод на основі науково обґрунтованого раціонального поєднання як відомих так і удосконалених біологічних та фізико-хімічних методів. Запропоновано удосконалений класифікатор технологій очищення природних вод з урахуванням їх багатокомпонентності. Розроблено системний підхід щодо вибору методів, процесів та апаратів. Доведено ефективність

використання комплексу методів гідродинамічної кавітації – коагуляції для вилучення розчинених у підземних водах органічних сполук, фенолів, іонів NH_4^+ . Встановлено основні закономірності та механізми процесів комплексного очищення підземних вод від іонів NH_4^+ , розчиненої органіки, сполук Fe(II) , по висоті контактного завантаження біореактора. Розроблено фізичну та на її основі математичну модель процесу біохімічного очищення підземних вод. Доведено можливість вилучення ІВМ (Cr^{6+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+}) із промивних вод гальванічного виробництва на матрикських структурах. Розроблено, досліджено, удосконалено та впроваджено технології з використанням комбінованих методів очищення.

Ключові слова: комплексне очищення багатокомпонентних підземних вод, комбіновані методи, матрикські структури біо – мінералів, гідродинамічна кавітація, стабілізаційна обробка води.

АННОТАЦИЯ

Квартенко А.Н. Развитие научных основ усовершенствования технологий очистки многокомпонентных подземных вод. – На правах рукописи.

Диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.17.21 – технология водоочистки. – КПИ, Киев, 2019.

Предложено направление развития научных основ с обоснованием методологии и механизмов комплексной водоподготовки и кондиционирования многокомпонентных подземных на основе научно обоснованного рационального сочетания как известных так и усовершенствованных биологических и физико-химических методов. Предложен усовершенствованный классификатор технологий очистки природных вод с учетом их многокомпонентности. Разработан системный подход к выбору методов водоочистки, а также используемых при этом процессов и аппаратов. Доказана эффективность использования комплекса методов гидродинамической кавитации – коагуляции для извлечения растворенных в подземных водах органических соединений, фенолов, ионов NH_4^+ . Установлены основные закономерности и механизмы процессов комплексной очистки подземных вод от ионов NH_4^+ , растворенной органики, соединений Fe(II) , по высоте контактной загрузки биореактора. Разработана физическая и на ее основе математическая модель процесса биохимической очистки подземных вод. Доказана возможность изъятия ионов (Cr^{6+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+}) из промывных вод гальванического производства на матрикских структурах. Разработаны, исследованы, усовершенствована и внедрены в производство технологии с использованием комбинированных методов водоподготовки.

Ключевые слова: комплексная очистка многокомпонентных подземных вод, комбинированные методы, матрикские структуры био-минералов, гидродинамическая кавитация, стабилизационная обработка воды.

SUMMARY

Kvartenko A.M. Development of scientific principles and improvement of technologies for treating multi-component underground waters. – Manuscript.

Thesis for academic degree of doctor of technical sciences in speciality 05.17.21 – technology of water treatment – KPI, Kyiv, 2019.

The direction is proposed of developing scientific principles with substantiating the methodology and mechanisms of the comprehensive treatment of underground waters from ammonia nitrogen, dissolved organics, Fe (II) compounds, phenols using combined methods; the development of new and improvement of existing technologies on the basis of scientifically substantiated rational unification of biological and physico-chemical methods. The classifiers are improved of the technology of treating underground waters taking into account their multicomponentness. The classification is proposed of underground waters by major physico-chemical indices of their quality which influence the selection of treatment technologies. The division into classes is adopted by standard classification of natural waters by the active pH reaction. Each class, in its turn, is divided into four subclasses by three specifying components: permanganate oxidation (PO), bicarbonate alkalinity, concentration of Fe^{2+} ions. The systemic approach is developed to choosing methods, processes and apparatuses of water treatment technologies. The specificity of this systemization is the totality of detailed differentiation of parameters of natural waters quality by values of pH, degree of aggressiveness (I_L), permanganate oxidation, bicarbonate alkalinity, content of heavy metals ions, NH_4^+ , $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$, and also methods, processes, devices, reagents necessary for water treatment. Theoretical principles are developed and the influence is experimentally proven of values of bicarbonate alkalinity, additional source of non-organic carbon, the strength of permanent magnetic field upon the efficiency of biological processes of treating underground waters. The efficiency is proven of using the complex of processes of hydrodynamic cavitation – coagulation for removing from underground waters humin complexes, phenols (up to 0,5 mg/cub.dm), ammonia nitrogen (up to 3,0 mg'cub.dm).

The basic regularities and mechanisms are determined of the processes of the comprehensive treatment of underground waters from ammonia nitrogen, dissolved organics, Fe(II) compounds, and also the changes of oxygen regime and pH values by the height of contact loading of the bioreactor depending on the duration of its operation, the time of water contact with matrix structures of biominerals.

The kinetic model is developed of the biochemical process of treating multi-component underground waters depending on the changed concentrations of Fe(II) compounds, non-organic carbon, the number of microorganisms in initial water with creating matrix structures of biominerals and considering their increased concentration in time with further transfer of torn structures, their further catch from the flow and transformation into static condition with the further filling the volume of intraporous space, which permits to establish the optimum duration of the process of water treatment in a bioreactor between washouts.

The basic regularities are determined of the joint use of biological and physico-chemical processes for treating multi-component underground waters under conditions of seasonal and annual changes of indices of their quality taking into account the uneven hydraulic loading on the technological equipment. It is proven that under the change of values of hydraulic loadings (from 5 to 10 m/hour) within the boundaries of filter cycle processes of water treatment are stable.

The further development grew of the theoretical principles of the mechanisms of destruction and extraction from underground waters of polluting substances with the help of combining methods of hydrodynamic cavitation-coagulation; the development and upgrading of the technologies of biological treatment of underground waters. Theoretical and

experimental studies were carried out concerning the improvement of technologies of comprehensive biological treatment of underground waters.

With the help of scanning electronic microscopy using the roentgen spectrometer changes are determined of parameters of qualitative and quantitative composition of microelements on matrix structures of biominerals during the period of the continuous operation of technological equipment. It is proven the possibility of removing ions of heavy metals (IHM): (Cr^{6+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+}) from washout waters of galvanic production and underground waters both on inert, and also on activated in a magnetic field matrix structures of biominerals, the mechanism is proposed of the process and the technology of treatment. New approaches are proposed to combining methods and installations for the comprehensive treatment of underground waters with obtaining the synergic effect, in particular in joining the following processes: correcting values of pH, bicarbonate alkalinity, concentration of non-organic carbon, usage of combined oxidizers: air oxygen, hydrogen peroxide, and also highly active radicals created as a result of the process of hydrodynamic cavitation; usage of matrix structures of biominerals in the complex with the solution of aluminum hydroxidechloride. In particular, a number of existing are improved and are developed new technologies using combined methods of purification and conditioning.

The work solves an important national economic problem of increasing the efficiency of the comprehensive treatment and conditioning of multi-component underground waters with different values of stability indices, pH, bicarbonate alkalinity, total rigidity, permanganate oxidation, colour, concentrations of calcium ions, heavy metals ions, ammonia nitrogen, phenols, carbon dioxide, by way of developing and putting into production technologies of combined treatment of underground waters.

Keywords: comprehensive treatment of multi-component underground waters, combined methods of treatment, matrix structures of *bio*-minerals, hydrodynamic cavitation, stabilization water processing.

Підписано до друку 18.07.2019 р. Формат 60×90¹/₁₆.

Ум.-друк. арк. 1,9. Тираж 100 прим.

Зам. № 5435.

*Видавець і виготовлювач
Національний університет
водного господарства та природокористування,
вул. Соборна, 11, м. Рівне, 33028.*

*Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного
реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів
видавничої продукції РВ № 31 від 26.04.2005 р.*